ASTROFÍSICA
¿Existe realmente la materia oscura?

EVOLUCIÓN HUMANA
Neandertales en la península ibérica

CIENCIAS DE LA TIERRA
¿Son periódicas las extinciones en masa?

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Octubre 2018 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de Scientific American

INMUNIDAD Y CEREBRO

Hasta ahora, el sistema inmunitario se creía separado del nervioso. Nuevas investigaciones revelan una profunda conexión entre ambos



6,90 EUROS

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

¿EXISTE LA MATERIA OSCURA? | NEANDERTALES EN LA PENÍNSULA IBÉRICA | CEREBRO Y SISTEMA INMUNITARIO

OCTUBRE 2018 N.° 505


MÁS DE 100 PREMIOS NÓBEL
han explicado sus hallazgos en
Investigación y Ciencia
NAT· MDCCC XXXIII ·OB· MDCCC XCVI
ALFR· NOBEL
®© THE NOBEL FOUNDATION
Descubre todos los artículos en
www.investigacionyciencia.es/nobel



FRANCISCO SECO, AP PHOTO

ARTÍCULOS


11


52


53

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

Tradicionalmente se pensaba que el cerebro y el sistema inmunitario operaban por separado. Pero investigaciones recientes han demostrado que el cerebro necesita que nuestras defensas funcionen correctamente. La principal tarea del sistema inmunitario podría ser detectar la presencia de microorganismos e informar de ello al cerebro. Constituiría así una suerte de séptimo sentido. Ilustración de Mark Ross.



redaccion@investigacionyciencia.es



Mayo 2018

RIESGO REPRODUCTIVO

En «Nuevos medios de reproducción» [Investigación y Ciencia, mayo de 2018], Karen Weintraub analiza las investigaciones que en el campo de la reproducción asistida están intentando convertir células sanguíneas o cutáneas en espermatozoides y óvulos viables. El artículo cita a Marcy Darnovsky, del Centro de Genética y Sociedad, quien cree que «las células germinales generadas in vitro nunca serán lo bastante inocuas para justificar los riesgos», a lo que añade que «el riesgo biológico para cualquier niño concebido con técnicas de genomanipulación siempre será demasiado alto». Al respecto, Darnovsky observa que numerosos embriones de mamíferos clonados acaban por no desarrollarse, y que algunos de los individuos que nacen lo hacen con malformaciones.

Sin embargo, es un hecho que también en la reproducción natural surgen con frecuencia embriones inviables y niños que nacen con problemas de salud. Por tanto, la pregunta no es si un método que emplea células sanguíneas o cutáneas en lugar de espermatozoides y óvulos puede ser perfecto, sino si puede ser mejor que su alternativa. Quizás en el futuro dicho método llegue a ser incluso más seguro que la reproducción natural si consigue eliminar ciertos trastornos congénitos, como el síndrome de Down. Y hasta puede que llegue el día en el que haya quien culpe a los padres que opten por la reproducción tradicional por haber puesto innecesariamente en riesgo a sus hijos al renunciar a métodos científicos más seguros.

John Orlando
Williston, Vermont

CEREBRO MECÁNICO

En «El impulso nervioso, reimaginado» [Investigación y Ciencia, junio de 2018], Douglas Fox expone el trabajo de los físicos Thomas Heimburg y Andrew D. Jackson, quienes argumentan que las señales entre neuronas son transmitidas por ondas mecánicas de expansión y contracción de la membrana celular, en lugar de mediante impulsos eléctricos, o potenciales de acción, tal y como propugna el modelo propuesto en su día por los investigadores británicos Alan Hodgkin y Andrew Huxley.

Heimburg sostiene que el modelo de Hodgkin y Huxley es simplemente erróneo. Sin embargo, resulta sorprendente que Heimburg ni siquiera intente buscar un compromiso entre ambos modelos. A la vista del gran éxito de las ecuaciones de Hodgkin-Huxley para describir los potenciales de acción, este debate requeriría abordar la manera en que el nuevo mecanismo logra explicar los fenómenos que ya esclarecía el antiguo. La lista de preguntas podría ser bastante larga, y hay varias que me atrevería a hacer. Entre ellas, cómo la mielinización de los axones da cuenta del aumento en la velocidad de conducción, y si la conducción en el modelo de Heimburg implica la transmisión a través de una sinapsis química.

Douglas A. Eagles

En su artículo, Fox sugiere la posibilidad de que un pulso de voltaje en una neurona inicie una deformación mecánica, y de que un pulso mecánico genere un voltaje. Dicho proceso recuerda a la manera en que los cambios de los campos eléctrico y magnético se alimentan uno a otro para dar lugar a una onda electromagnética que se propaga. ¿Es posible que la interacción entre los efectos eléctricos y mecánicos sea realmente necesaria para que las neuronas funcionen?

Peter Sochacki
Schaumburg, Illinois

Responde Fox: *Heimburg, Jackson y sus colaboradores han pasado años reuniendo pruebas para dotar a su teoría de una base física sólida. Sin embargo, Eagles tiene razón cuando observa que la teoría no explica por qué la mielinización aumenta la velocidad de los pulsos nerviosos ni cómo un pulso mecánico podría desencadenar la liberación de neurotransmisores en una sinapsis. Tales preguntas deberán abordarse para que la teoría basada en ondas mecánicas aumente su credibilidad. Ello probablemente requerirá que los biólogos tomen el relevo y continúen el trabajo allí donde lo han dejado los físicos.*

Estoy de acuerdo con Sochacki: si una onda mecánica es realmente parte de la conducción nerviosa, entonces parece plausible que las señales mecánicas y las eléctricas puedan producirse y reforzarse mutuamente. Las membranas lipídicas han existido desde el origen de la vida, y parece razonable sospechar que las proteínas del canal iónico, que se alojan en el interior de las membranas, tal vez hayan evolucionado para no solo tolerar esas fuerzas a la nanoescala, sino para aprovecharlas.

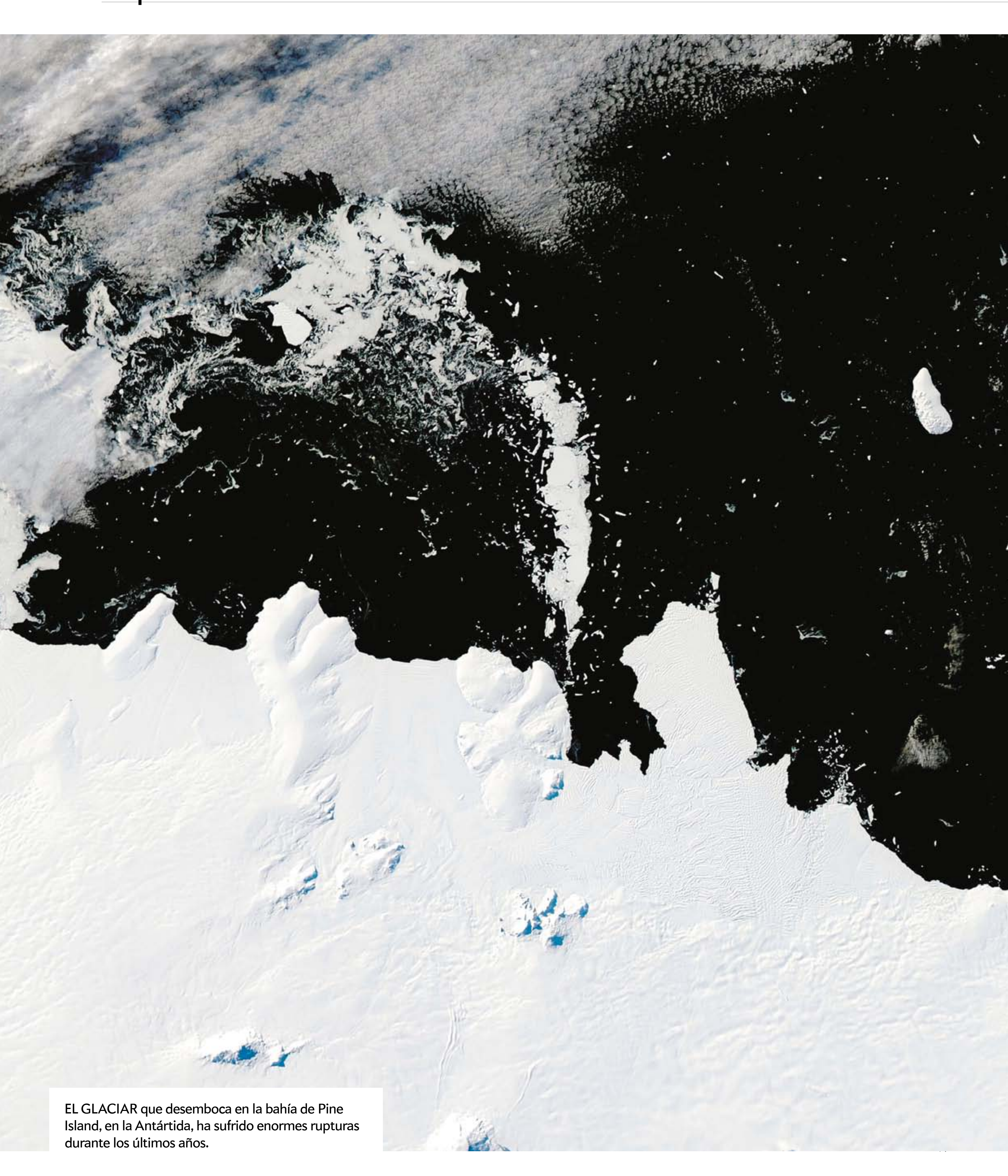


Junio 2018

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es
La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

Apuntes



EL GLACIAR que desemboca en la bahía de Pine Island, en la Antártida, ha sufrido enormes rupturas durante los últimos años.






ALAMY

CLIMA

Glaciares en descomposición

Los mapas del fondo marino revelan el accidentado viaje de un glaciar antártico

El glaciar de Pine Island, en la Antártida, ostenta un dudoso honor: debido a la enorme cantidad de hielo que ha perdido en los últimos decenios, es el principal responsable de la región del aumento global del nivel del mar. Ahora, los científicos han identificado la probable causa de algunos de los desprendimientos más espectaculares que ha experimentado este glaciar, en los que se han creado icebergs varias veces más grandes que Manhattan.

Al parecer, las responsables son algunas crestas de roca sumergidas que de vez en cuando se elevan lo suficiente para golpear el fondo del glaciar. Eso crea pequeñas grietas que crecen y acaban haciendo que se desprendan inmensos trozos de hielo. Pero no todo son malas noticias. Las rocas submarinas también pueden ayudar a estabilizar el glaciar, ya que al rozar contra su superficie inferior lo apuntalan y evitan que avance más rápido hacia el mar.

Jan Erik Arndt, geofísico del Instituto Alfred Wegener-Centro Helmholtz para la Investigación Polar y Marina, en Alemania, y sus colaboradores partieron de Punta Arenas, Chile, en febrero de 2017 a bordo del rompehielos *Polarstern*. Aproximadamente una semana más tarde llegaron a la bahía de Pine Island, una ensenada llena de icebergs y dominada por el frente del glaciar, de 40 metros de altura. Con ello se proponían descubrir qué era lo que controlaba la estabilidad de esa gran extensión de hielo.

Arndt y sus colaboradores enviaron ondas sonoras desde el casco del *Polarstern* al interior del agua casi helada. Al medir cuánto tardaban en rebotar en el fondo marino y regresar al barco, pudieron cartografiar cientos de kilómetros cuadrados de la topografía submarina de la bahía. Los investigadores se centraron en una zona que había quedado a la vista tras un desprendimiento reciente del glaciar: una franja del fondo marino que solía estar bajo 400 metros de hielo. «Era una bue-

na oportunidad para ir allí y explorar una región a la que antes no era posible acceder», asegura Arndt.

Arndt y su equipo descubrieron un complejo paisaje submarino en el que, literalmente, sobresalía un elemento: un afloramiento rocoso que, en su punto más alto, se acercaba a 375 metros de la superficie. «Nos sorprendió ver esa enorme cresta», relata Arndt. Los investigadores se percataron de que, en el pasado, aquella roca probablemente había ejercido presión sobre el fondo del glaciar de Pine Island. Lo que les permitió llegar a esta conclusión fue un abultamiento en la superficie del glaciar —lo que los glaciólogos denominan una «arruga»— que aparecía directamente sobre la posición de la cresta en las imágenes de archivo tomadas por satélite. «Hemos visto la huella que dejó la topografía subyacente en la superficie de la plataforma de hielo», explica Arndt. Sin embargo, al presionar contra el hielo, la cresta también actuaba como un freno que impedía que el glaciar avanzara libremente hacia el océano, según la hipótesis de los investigadores. De hecho, sospechan que probablemente llevase anclado de esa manera desde los años cuarenta del siglo pasado.

No obstante, el freno acabaría fallando: el glaciar de Pine Island seguramente perdió el contacto con la cresta en 2006, después de que una corriente de agua más cálida erosionara la parte inferior del glaciar. Fue entonces cuando la arruga desapareció de las imágenes por satélite, según un artículo publicado en junio por los investigadores en la revista *Cryosphere* (los científicos matizan que es muy posible que un volcán situado bajo el glaciar y descubierto este año también contribuya a la pérdida de hielo). A medida que el glaciar de Pine Island se deslizaba de nuevo hacia el mar, lo más probable es que impactara contra otros elementos rocosos sumergidos e identificados por el *Polarstern*. Esas colisiones generaron tensiones en el hielo y crearon las grietas kilométricas observadas en las imágenes de 2007 y 2011. Luego, las fisuras crecieron y acabaron produciendo los enormes icebergs.

La topografía del fondo marino reviste una importancia fundamental para la estabilidad de una plataforma de hielo, apunta Richard Alley, experto en geociencia de la Universidad Estatal de Pensilvania que no participó en la investigación. El nuevo estudio, según Alley aborda «una pregunta interesante en un lugar fascinante». Jeremy Bassis, glaciólogo de la Universidad de Michigan, añade que las depresiones y protuberancias que hay en el fondo del océano desempeñan «un papel fundamental a la hora de regular cuándo se romperá el hielo que hay sobre ellas».

A medida que los glaciares se adentran en el agua y se derriten, el nivel del mar aumenta. Eso es una mala noticia para gran parte de la población mundial, ya que cerca del 40 por ciento de las personas viven a menos de cien kilómetros de la costa. Hay algunas ciudades que ya se encuentran por debajo del nivel del mar, como Nueva Orleans. Otras, como Miami, sufren inundaciones frecuentes.

Por ahora, el glaciar de Pine Island se mantiene estable. Su sección norte permanece anclada por una pequeña loma en tierra firme y una gruesa corriente de hielo rodea su cara sur. Pero Arndt y sus colaboradores creen que la situación está a punto de cambiar. A finales del año pasado, observaron una grieta de 30 kilómetros en el glaciar. Probablemente, esa grieta esté marcando el lugar donde se producirá el próximo desprendimiento. *—Katherine Kornei*

NEUROCIENCIA

Códigos de barras cerebrales

Una técnica innovadora permite cartografiar el cerebro con un grado de detalle inédito



Los neurocientíficos saben muchísimo sobre el funcionamiento de las neuronas a escala individual, pero bastante poco sobre cómo cooperan multitud de ellas para crear los pensamientos, los sentimientos y las conductas. Necesitan obtener un esquema de las conexiones neurales, el llamado conectoma, para descubrir los circuitos que se ocultan tras las funciones de un órgano.

Ahora, investigadores del Laboratorio de Cold Spring Harbor y otros colaboradores han ideado una novedosa técnica de cartografía cerebral con la que han trazado las conexiones que proyectan casi 600 neuronas ubicadas en la principal área visual del cerebro del ratón en solo tres semanas. Algún día esta técnica podría ayudar a desentrañar los trastornos que supuestamente derivan de conexiones anómalas, como el autismo o la esquizofrenia.

El fundamento consiste en el marcaje de las neuronas con «códigos de barras» genéticos. Para ello, se inyecta un virus en el cerebro del ratón que induce a las células a sintetizar secuencias aleatorias de ARN formadas por 30 letras del código genético (G, A, U y C). Las células crean al mismo tiempo una proteína que se une a esos códigos de barras de ARN y los arrastra a lo largo del axón neuronal. Acto seguido, se diseccionan las regiones cerebrales de interés y se secuencian células de cada una de ellas para saber con qué regiones ha establecido conexión cada neurona marcada.

El equipo comprobó que las neuronas de la corteza visual primaria del ratón transmiten normalmente señales a muchas otras áreas visuales. También descubrió que la mayoría de las neuronas recaen en seis categorías según las regiones a las que proyectan sus conexiones. El hallazgo plantea la concurrencia de varios subtipos de neuronas en la corteza visual primaria, especializados en distintas funciones. «Puesto que la cantidad de neuronas es ingente, hemos de hacer cálculos estadísticos para comenzar a desentrañar los patrones que vemos», afirma Justus Kebschull, de Cold Spring, codirector del estudio, presentado en abril en *Nature*.

El método del código de barras supone un avance importante en la cartografía del conectoma. Con solo 30 nucleótidos, un investigador es capaz de crear más secuencias únicas que neuronas alberga el cerebro, afirma Botond Roska, neurocientífico del Instituto de Oftalmología Clínica y Molecular de Basilea, que no ha participado en el trabajo: «Vaticino que cuando esta técnica madure, se convertirá en una herramienta fundamental para analizar la conectividad del cerebro». *—Simon Makin*

ASTROBIOLOGÍA

Sin noticias de E.T.

La antigua atmósfera de la Tierra plantea dudas sobre la posibilidad de detectar vida extraterrestre

Respire hondo. Alrededor del 20 por ciento del aire que acaba de pasar por su boca o fosas nasales es oxígeno, el gas que necesita buena parte de la vida en la Tierra. Sin embargo, si hubiera hecho lo mismo hace 1870 millones de años, no habría sobrevivido.

Hasta hace poco no se sabía demasiado sobre la abundancia de oxígeno en la atmósfera de la Tierra primitiva, cuando los microorganismos eran la única vida sobre el planeta. Ahora, durante un trabajo de campo efectuado en el norte de Canadá, un grupo de geólogos ha confirmado por primera vez que, por aquel entonces, el oxígeno era extremadamente escaso.

El hecho de que la vida pudiera florecer con niveles tan bajos de oxígeno supone un problema para quienes buscan vida extraterrestre. La presencia de este gas en la atmósfera de un exoplaneta se consideraría un signo revelador de que podría albergar vida, explica Noah Planavsky, biogeoquímico de la Universidad de Yale y uno de los autores del nuevo estudio, publicado en julio en *Proceedings of the National Academy of Sciences*. No obstante, si la vida puede desarrollarse incluso en ambientes con concentraciones muy bajas de oxígeno, los telescopios espaciales diseñados para detectar este gas podrían no inferir nunca la presencia de vida. «Aun si esos planetas rebosaran de vida compleja, podrían parecer planetas muertos desde el punto de vista de la detección remota», señala Planavsky.

Planavsky y su equipo estudiaron rocas para determinar la concentración de cerio, un elemento que sirve como indicador de los antiguos niveles de oxígeno. El oxígeno se une al cerio que hay en el agua del mar y lo elimina, reduciendo así la cantidad de cerio que se depositará en las rocas sedimentarias. Según los investigadores, los niveles de cerio medidos corresponden a concentraciones de oxígeno de aproximadamente el 0,1 por ciento de los niveles atmosféricos actuales.

Planavsky defiende que tales datos deberían servir de guía a la hora de construir la próxima generación de telescopios que intenten buscar vida en otros mundos. Los que ya se están desarrollando, como el telescopio espacial James Webb, de la NASA, no pueden detectar concentraciones tan bajas de oxígeno, añade Edward Schwieterman, astrobiólogo de la Universidad de California en Riverside que no participó en el trabajo.

Puede que las futuras misiones con telescopios espaciales estén preparadas para detectar bajas concentraciones de oxígeno. Pero, por el momento, los investigadores que exploran el cielo en busca de E.T. no deberían hacerse demasiadas ilusiones. —*Lucas Joel*

COGNICIÓN

Ver siendo ciega

Una mujer invidente es capaz de percibir el movimiento

Milena Canning puede ver el vapor que sale de una taza de café, pero no la taza. Puede ver la coleta de su hija balanceándose de un lado a otro, pero no a su hija. Canning está ciega, pero los objetos en movimiento logran de algún modo abrirse un camino hasta su percepción. Los científicos que estudian su afección afirman que podría revelar secretos sobre la manera general en que los seres humanos procesamos la visión.

Canning tenía 29 años cuando un derrame cerebral destruyó por completo su lóbulo occipital, la región del cerebro que alberga el sistema visual. Este suceso la dejó ciega, pero un día vio un destello metálico proveniente de una bolsa de regalo cercana. Sus médicos le dijeron que estaba teniendo alucinaciones.

«Yo pensé que debía estar ocurriendo algo en mi cerebro [que me permitía ver]», explica ella. Así que Canning fue de médico en médico hasta que conoció a Gordon Dutton, un oftalmólogo de Glasgow. Dutton ya se había topado con el mismo misterio antes, en un artículo escrito en 1917 por el neurólogo George Riddoch en el que describía a soldados de la Primera Guerra Mundial con lesiones cerebrales. Para ayudar a potenciar la visión basada en el movimiento de Canning, Dutton le recetó una mecedora.

Canning es una de las pocas personas diagnosticadas con el «síndrome de Riddoch», la capacidad de percibir movimiento aun siendo ciego a otros estímulos visuales. Jody Culham, neurocientífica de la Universidad Occidental de Ontario, y sus colaboradores emprendieron una investigación de diez años acerca de la extraordinaria visión de Canning. Sus resultados se publicaron en línea el pasado mayo en *Neuropsychologia*. El equipo confirmó que Canning era capaz de detectar el movimiento y su dirección. Podía ver una mano moviéndose hacia ella, pero no distinguir entre un pulgar extendido hacia arriba y uno hacia abajo. También logró sortear obstáculos, extender la mano y agarrar objetos, y atrapar una pelota lanzada hacia ella.

Las resonancias de Canning mostraron un agujero del tamaño de una manzana allí donde debería estar la corteza visual. Pero la lesión aparentemente no afectó a la región del cerebro que procesa el movimiento, el área visual temporal medial. «Hay que atribuir todo el mérito [de la percepción de Canning] a una temporal visual intacta», señala Beatrice de Gelder, neurocientífica de la Universidad de Maastricht que no participó en el estudio.

El siguiente misterio es cómo llega la información desde los ojos hasta el área temporal medial sin pasar por la corteza visual. «Yo imagino la vía óptica principal como una autopista. En el caso de Milena, la autopista está cortada, pero existe toda una serie de carreteras secundarias que van a la temporal medial», explica Culham. «Tiene que tratarse de una de esas rutas indirectas, pero aún no estamos seguros de cuál», añade. Lo más probable es que tales carreteras secundarias existan en todos nosotros como restos del sistema visual primitivo, que evolucionó para detectar amenazas que se aproximaban incluso sin tener una visión completamente desarrollada, concluye Culham.

Canning está encantada de participar en el estudio. «Si puedo ayudarles a entender mejor el cerebro», dice, «podría entender por qué veo lo que veo».

—*Bahar Gholipour*

THOMAS FUCHS

MEDICINA DEL DEPORTE

Lesión sexista

Las futbolistas son más vulnerables a los daños cerebrales que sus homólogos masculinos

El remate de cabeza pasa factura al cerebro de los futbolistas. Pero ese coste, medido en función del volumen de neuronas dañadas, es cinco veces mayor en las mujeres que en los varones, advierte una investigación novedosa.

El estudio ofrece una explicación biológica del porqué las jugadoras lesionadas refieren síntomas más graves y requieren un tiempo de recuperación más largo que los jugadores. Hasta ahora, algunos investigadores no habían tenido en cuenta las quejas de las jugadoras porque apenas existían indicios fisiológicos de la diferencia, afirma Michael Lipton, neurocientífico en el Colegio de Medicina Albert Einstein y uno de los firmantes del artículo.

El equipo de Lipton recurrió a la resonancia magnética para examinar el interior del cráneo de 98 jugadores aficionados de fútbol adultos —la mitad de cada sexo— que habían practicado el remate de cabeza con distinta frecuencia durante el año anterior. En las jugadoras, ocho regiones de la sustancia blanca que canaliza las señales cerebrales presentaban deterioro estructural, en contraste con solo tres en los varones (la magnitud del daño corría paralela al número de cabezazos referidos). Es más, las jugadoras del estudio mostraban daños en un promedio cercano a los 2100 milímetros cúbicos de tejido cerebral, mientras que sus iguales masculinos solo presentaron una media de 400 milímetros cúbicos.

Lipton ignora de momento la causa de tal diferencia entre los sexos, pero apunta dos posibilidades. Las mujeres podrían sufrir más con el latigazo que supone el impacto contra el cráneo, pues en general poseen menos masa muscular que los hombres con la que estabilizar el cuello y la cabeza. Otra hipótesis barajada es que el notable descenso de la progesterona que tiene lugar durante ciertas fases del ciclo menstrual podría exacerbar la vulnera-



QUÍMICA

Aceite en el vino

El aceite de argán podría facilitar la elaboración de vino con levaduras más exóticas

Cada botella de gran vino nace de una simple infección fúngica. Los vinateros tradicionales confiaban en las levaduras espontáneas para transformar el azúcar de la uva en alcohol; los enólogos modernos adquieren cepas industriales. Ahora, con el propósito de distinguir sus productos, algunos de los mejores vinicultores están volviendo a examinar la diversidad de fermentadores microbianos que brinda la naturaleza. Pero no todas las levaduras naturales resisten los procesos industriales de producción, por lo que un aditivo natural podría ser la solución, según apunta una investigación reciente.

Los productores a gran escala multiplican la levadura en presencia de oxígeno, un elemento que puede dañar la pared celular y proteínas importantes de este microorganismo a través del proceso de oxidación. Ello puede dificultar que, una vez en su destino (adonde llega deshidratada), cumpla su cometido cuando es revivida por el vinicultor. La bioquímica Emilia Matallana, de la Universidad de Valencia, y sus colaboradores han estado investigando formas prácticas de neutralizar durante años esa oxidación. Después de comprobar que los antioxidantes puros funcionan, emprendieron



CABRAS encaramadas a un árbol de argán.

ERIK ISAKSON, GETTY IMAGES (*futbolista*); YAVUZ SARIYILDIZ, GETTY IMAGES (*árbol de argán*)

bilidad femenina al daño cerebral, pues dicha hormona ejerce una acción antinflamatoria.

Thomas Kaminski, fisiólogo deportivo de la Universidad de Delaware, ajeno al trabajo, lo califica como pionero. La investigación resulta singular porque pone de relieve el efecto acumulativo de los golpes reiterados sobre el cráneo, en contraposición a las lesiones traumáticas importantes, explica. «Muy pocos de esos jugadores y jugadoras tenían antecedentes de conmoción cerebral.»

Ahora los especialistas están ansiosos por saber si tales cambios en la sustancia blanca acarrean secuelas a la larga en las capacidades cognitivas. Hasta que no sepamos más, Kaminski propugna un enfoque preventivo que limite el daño causado por esa técnica de juego. En agosto se reunió con responsables de la Federación Estadounidense de Fútbol con el fin de redactar una serie de consejos sensatos para la práctica del remate de cabeza en las ligas infantiles y juveniles.

Carla García, una de las participantes en el estudio de Lipton, afirma que después de jugar a fútbol durante 47 años no va a dejar de rematar así, pero puntualiza: «Todo lo que haga la práctica del deporte más segura para los niños merece la pena».

—*Daniel Ackerman*

la búsqueda de una fuente natural más asequible. La hallaron en el argán, un fruto similar a la aceituna empleado en alimentación y cosmética. El árbol productor prospera en zonas donde ramonean rebaños de cabras domésticas.

El año pasado, Matallana y su equipo trataron con el aceite de argán tres variedades de levadura de cerveza (*Saccharomyces cerevisiae*) antes de proceder a su deshidratación y posterior rehidratación. El aceite impidió la oxidación de proteínas importantes de las levaduras y facilitó la fermentación del vino, según describen en un estudio publicado en línea el pasado junio en *Innovative Food Science & Emerging Technologies*.

Ahora a los microbiólogos les interesa estudiar cómo y por qué cada cepa de levadura responde a su modo ante el aceite de argán, aclara el enólogo Ramón González, del Instituto de las Ciencias de la Vid y del Vino, en Logroño, ajeno al estudio. Tal vez algún día el aceite permita a los vinicultores emplear una gama más amplia de levaduras especiales y servir vinos más variados en la mesa. Y en cuanto al sabor que el aceite confiere al producto, Matallana asegura que «no desentona en absoluto».

—*Lucas Laursen*

MEDIOAMBIENTE

¿Favorece la tala de árboles a los jaguares?

Las operaciones forestales bien reguladas pueden proteger a los grandes felinos

Los jaguares, los felinos de mayor tamaño del continente americano, necesitan mucho espacio. Un macho puede deambular por un territorio y recorrer decenas de kilómetros cuadrados para aparearse y atrapar a sus presas. Pero a medida que la ganadería, la agricultura y otras formas de desarrollo invaden los bosques tropicales, estos temibles depredadores están perdiendo terreno.

Un estudio publicado en el número de abril de *Biological Conservation* permite albergar esperanzas. Científicos del zoológico de San Diego, la Sociedad para la Conservación de la Fauna Silvestre (WCS, por sus siglas en inglés) y el Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre del Perú observaron que, en algunos bosques de Guatemala y Perú sometidos a una tala regulada (certificados por expertos independientes como «bien gestionados»), la densidad de los jaguares era similar a la de zonas protegidas u otros hábitats de alta calidad. Este estudio se suma a un conjunto creciente de datos que indican que este tipo de bosques pueden constituir importantes corredores biológicos para los grandes felinos.

Los investigadores examinaron las concesiones de explotación forestal en la Reserva de la Biosfera Maya de Guatemala, una zona de conservación reconocida internacionalmente que cuenta con tres niveles de protección: un núcleo de parques nacionales; una zona intermedia donde están permitidas la agricultura y la ganadería; y una zona multiusos donde se permite la tala restringida pero está prohibido el ganado. Todas las operaciones forestales en la reserva deben ser certificadas por el Consejo de Administración Forestal (FSC), una organización independiente, sin ánimo de lucro. Esta asociación fue fundada en 1993 por un consorcio internacional de entidades de protección ambiental e industriales. El FSC establece normas para una explotación maderera muy restringida. La caza en las zonas de bosque estudiadas está estrictamente prohibida, y el acceso a los caminos está vigilado, si bien se produce cierta caza de subsistencia en otros lugares de la reserva.

Los científicos utilizaron cámaras trampa y un modelo informático multiespecie para determinar si la densidad de los jaguares en la Reserva de la Biosfera Maya era similar a la que existe en hábitats semejantes en la región del Gran Chaco de Bolivia y el Parque Nacional de las Emas en Brasil. En Perú, los investigadores aplicaron las mismas técnicas en bosques certificados por el FSC en la región Madre de Dios, en la cuenca amazónica, y constataron una densidad de jaguares incluso mayor. Tanto en Guatemala como en Perú, detectaron otras 20 especies más de mamíferos, incluidas las presas de los grandes felinos. El dosel arbóreo abierto desde hace poco tiempo puede haber propiciado el crecimiento de las plantas de las que estas especies se alimentan.

Anand Roopsind, becario posdoctoral de investigación en la Universidad Estatal de Boise, que no intervino en el estudio, afirma que estos hallazgos ratifican otros anteriores que demuestran el valor de la tala controlada de los bosques en la protección del jaguar. El FSC goza de un apoyo importante entre los conservacionistas. No obstante, algunos han criticado aspectos del programa, como los posibles conflictos de intereses, ya que los certificadores están contratados directamente por empresas forestales.

Sin embargo, tanto Roopsind como el coautor del estudio John Polisar, coordinador del Programa para la Conservación del Jaguar de la WCS, hacen hincapié en que las zonas de tala restringida pueden constituir importantes corredores para la fauna silvestre entre zonas más protegidas. En palabras de Roopsind: «Si manejamos los bosques realmente bien, el impacto sobre los grandes mamíferos es mínimo y mucho mejor que la conversión en terrenos de ganadería o espacios agrícolas». Polisar va aún más lejos: «Si la densidad de los jaguares es buena, sabemos que el bosque está bien gestionado».

—*Amy Mathews Amos*



LOS BOSQUES con una tala restringida pueden constituir corredores de hábitat cruciales para los jaguares.

GETTY IMAGES

FISIOLOGÍA ANIMAL

La inmunidad de la bandada

El modo en que las aves combaten las infecciones depende de sus hábitos migratorios



BISBITA COMÚN (*Anthus pratensis*)

Cada año, conforme el otoño deja paso al invierno, multitud de aves de Europa y Asia emprenden el vuelo hacia el sur, en busca de la bonanza del África tropical. Y cuando la primavera asoma, retornan a las latitudes templadas para aparearse y criar. Los expertos querían saber por qué las aves migradoras no contraen los males del viajero.

«Cuando escogemos un destino lejano para pasar las vacaciones, precisamos vacunas de todo tipo. Pero las aves no gozan de la protección que brinda la medicina. ¿Cómo hacen frente a las infecciones?», se preguntaba Emily O'Connor, ecóloga de la Universidad de Lund.

Para averiguarlo, ella y sus colaboradores clasificaron más de 1300 especies de aves paseriformes que eran migratorias, sedentarias africanas o sedentarias paleárticas (entre estas últimas la bisbita común; *imagen*). A continuación, capturaron ejemplares en libertad de un conjunto representativo de 32 especies. Tomaron muestras de su sangre para analizar los genes que codifican el complejo principal de histocompatibilidad de clase I (CPH-I), un conjunto de proteínas del sistema inmunitario implicadas en el reconocimiento de los microbios patógenos. Cuanto más numerosos son esos genes, más intrusos pueden detectar las defensas del animal, explica la investigadora.

Con ese baremo, las aves sedentarias de África mostraron el sistema inmunitario más robusto. Puesto que la mayor parte de la avifauna del Paleártico tuvo su origen en los trópicos y en momentos posteriores se extendió hacia el norte, los investigadores sospechan que las especies que la integran vieron reducida con el tiempo su diversidad de CPH-I. Los resultados se publicaron el pasado mayo en *Nature Ecology & Evolution*.

«A causa de su forma de vida, las aves migratorias deben hacer frente a dos conjuntos distintos de patógenos. Por ello esperaba ver en ellas la mayor diversidad génica de todos los grupos, así que me sorprendió comprobar que era muy similar a la de las aves europeas», manifiesta O'Connor.

Las crías son muy vulnerables a los patógenos, y el esfuerzo que supone la reproducción también expone más a los progenitores a caer enfermos. Por ambas razones, O'Connor sospecha que la evolución podría haber empujado a las especies migratorias a favorecer los genes asociados a la resistencia a los patógenos propios de las latitudes septentrionales, donde nacen, en detrimento de los que protegen contra los tropicales.

Otra alternativa es que las especies migratorias hubieran apostado por otras formas de inmunidad inespecíficas, opina Camille Bonneaud, bióloga evolutiva de la Universidad de Exeter, ajena al estudio. Según ella, «será preciso seguir investigando si las aves migratorias destinan menos recursos a la lucha contra patógenos concretos, y más a otros tipos de procesos inmunitarios».

—Jason G. Goldman

BIOLOGÍA

Equilibrio corporal

Las extremidades crecen al unísono en el feto

Los animales de simetría bilateral han vagado por el planeta desde hace unos 400 millones de años. El ser humano ha mostrado un vivo interés por esta propiedad de nuestra especie: piénsese en la importancia de la simetría en la percepción de la belleza o en la célebre representación del cuerpo humano con los brazos y piernas extendidos del Hombre de Vitruvio, obra de Leonardo da Vinci.

Ahora, la ciencia ha dado un paso más. Alberto Roselló-Díez, biólogo del desarrollo en el Instituto Australiano de Medicina Regenerativa de la Universidad Monash, ha liderado un estudio sobre cómo el feto del ratón mantiene la simetría al crecer. Al hacer que una de las extremidades del feto creciera más lentamente que la otra, observó que las células se comunican para corregir la asimetría. Ningún estudio había examinado con éxito el fenómeno hasta ahora.

Tras un año de intentos fallidos, el equipo de Roselló-Díez logró crear un modelo en ratones. Mediante una técnica desarrollada para modificar células en una placa de laboratorio, inyectaron en la pata trasera izquierda de los fetos un tipo de célula que limita el crecimiento de esta. Así descubrieron que las células que circundan el tejido reprimido se comunicaban con la placenta, que a su vez avisaba al resto de los tejidos —entre ellos a la otra extremidad trasera— para que moderaran su crecimiento hasta que el miembro retrasado los alcanzase. Solo en ese momento se reanudaba el crecimiento uniforme. El descubrimiento se publicó en junio en *PLOS Biology*.

Debemos imaginar este proceso como una «carrera a tres patas», afirma Kim Cooper, bióloga celular y del desarrollo en la Universidad de California en San Diego, ajeno al estudio. «Si la persona camina más deprisa, será más difícil mantener la sincronización. Ese mecanismo placentario evita que la extremidad lenta quede rezagada.»

La investigación profundiza en el desarrollo de los miembros y en el llamado crecimiento convergente. Pero, además, plantea nuevas incógnitas: una vez que el miembro ha alcanzado el mismo grado de desarrollo, ¿cómo sabe el otro que debe reanudar el suyo? En palabras de Adrian Halme, biólogo celular de la Universidad de Virginia, que tampoco ha participado en el estudio: «Esperamos de nuestros miembros que sean simétricos. Pero es realmente sorprendente cómo lo consiguen».

—Maya Miller



FETO de ratón en desarrollo.

ABI WARNER, GETTY IMAGES (*bisbita común*); STEVE GSCHMEISSNER, SCIENCE SOURCE (*feto de ratón*)



SALUD

Alivio para el puerperio

Un nuevo fármaco serviría para tratar una forma común de depresión que surge tras dar a luz

La depresión puerperal afecta a entre el 10 y el 20 por ciento de los casi cuatro millones de mujeres que cada año son madres en Estados Unidos. El trastorno puede interferir con el vínculo que une a la madre con su hijo y poner en riesgo el desarrollo de este hasta la adolescencia. No existe tratamiento específico, pero ahora un medicamento nuevo podría cambiar esta situación.

«Es realmente importante diagnosticar a las mujeres [deprimidas] para poder tratarlas con premura», asegura Samantha Meltzer-Brody, directora del Programa de Psiquiatría Perinatal en el Centro de Trastornos del Humor Femenino de la Universidad de Carolina del Norte. Recientemente ha realizado ensayos con el medicamento, el cual actúa sobre ciertos cambios hormonales en las nuevas madres.

Muchas puérperas aquejadas de este tipo de depresión reciben antidepresivos convencionales, como los inhibidores selectivos de la recaptación de la serotonina, entre ellos el Prozac. Aun así, no está claro que sean eficaces, pues existe la sospecha de que el neurotransmisor en cuestión, la serotonina, puede desempeñar un papel secundario en el trastorno, tal vez incluso nulo. En su lugar, algunos investigadores señalan otro proceso biológico como posible culpable.

La gestación provoca un aumento drástico de dos tipos de hormonas reproductoras, los estrógenos y la progesterona. También genera un pico en la concentración cerebral de un esteroide, la alopregnanolona, que normalmente activa los receptores del GABA (un neurotransmisor que indica a las neuronas del cerebro que deben cesar su actividad). Los receptores gabaérgicos permanecen en latencia durante la gestación para evitar la sobreactivación por parte de la alopregnanolona; de no ser así, la gestante quedaría virtualmente anestesiada. Poco después de finalizado el parto, los estrógenos, la progesterona y la alopregnanolona recuperan los valores normales, con lo que la actividad de los receptores gabaérgicos repunta con rapidez. Pero en algunas de las madres, este repunte se demora más de lo habitual, lo que podría derivar en la depresión.

El nuevo fármaco, desarrollado por Sage Therapeutics, actúa elevando la alopregnanolona. De ese modo, activa los receptores gabaérgicos y mantiene el neurotransmisor en los niveles correctos. En uno de los estudios de Meltzer-Brody, un ensayo clínico de fase II con 21 puérperas afectadas por depresión grave, el 70 por ciento de las tratadas con el medicamento vieron remitir el trastorno. Y aún más importante, el efecto se materializó casi de inmediato y los beneficios persistieron durante 30 días. Desde entonces, Sage Therapeutics ha llevado a cabo dos ensayos clínicos de fase III con 226 madres en total, cuyos datos preliminares parecen alentadores. La brexanolona, como se llama, está siendo objeto de revisión en este momento por la Administración de Alimentos y Medicamentos de EE.UU.

Sin embargo, no todo el mundo está convencido de que esa vía hormonal sea la responsable en exclusiva. Joseph Lonstein, profesor de psicología en la Universidad Estatal de Michigan, ajeno al estudio, opina: «Dudo mucho de que sea el único sistema alterado en las madres aquejadas por la depresión o la ansiedad puerperal, pero es perfectamente razonable que lo esté».

—Dana G. Smith

GETTY IMAGES (*Madre y bebé*); MUSEO NACIONAL DE CIENCIAS NATURALES

AGENDA

CONFERENCIAS

8 de octubre
Las plataformas experimentales: ¿La respuesta a una megaciencia globalizada?
Marzio Nessi, CERN
Fundación BBVA
Madrid
www.fbbva.es

11 de octubre
CRISPR: Tijeras moleculares para editar nuestros genes
Lluís Montoliu, Centro Nacional de Biotecnología
Casa de la Ciencia
Sevilla
www.casadelaciencia.csic.es

15 de octubre
Materiales orgánicos para nuevos dispositivos electrónicos
Marta Mas, Instituto de Ciencia de Materiales
Fundación Ibercaja
Zaragoza
obrasocial.ibercaja.es

18 de octubre
Nanotecnología: La revolución de los nuevos materiales
Hermenegildo García, Universidad Politécnica de Valencia
Museo de las Ciencias
Valencia
www.cac.es

EXPOSICIONES

Hasta el 21 de octubre
Compañeros de piso: La biodiversidad doméstica
Museo Nacional de Ciencias Naturales
Madrid
www.mncn.csic.es



Hasta el 28 de octubre
Células sobre lienzo
Museo de Ciencias Naturales
Barcelona
museuciencies.cat

OTROS

Concurso
Premio Lluís Santaló 2018
Narrativa científica y matemática
Convoca: Universidad de Gerona
www.udg.edu

GENÉTICA DE POBLACIONES

Luigi Luca Cavalli-Sforza: simbiosis de ciencia y humanidades

El eminente genetista italiano sentó un antes y un después en la aplicación de modelos cuantitativos para estudiar la evolución, la historia y la cultura humanas

JOAQUIM FORT

El pasado 31 de agosto fallecía a los 96 años de edad Luigi Luca Cavalli-Sforza, científico italiano de gran prestigio cuyo trabajo ejerció una enorme influencia en la genética de poblaciones. Su legado, sin embargo, va mucho más allá. También será recordado por sus contribuciones a la antropología, la arqueología y la lingüística, así como por sus impresionantes aportaciones a la descripción matemática de los procesos históricos y culturales. En la combinación de ciencias naturales y humanidades, sería difícil encontrar a otro investigador que haya destacado tanto como Cavalli-Sforza.

Durante sus años de estudiante de medicina en Pavía (1939-1944), Cavalli-Sforza comenzó a investigar en genética de bacterias. A este ámbito dedicó su estancia posdoctoral en la Universidad de Cambridge (1949-1950), en el grupo del eminente genetista y estadístico Ronald A. Fisher. De vuelta a Italia siguió trabajando en genética de bacterias con Joshua Lederberg, quien más tarde recibiría el premio Nobel de medicina por sus trabajos sobre recombinación genética. Y en 1952 comenzó a investigar sobre genética de poblaciones humanas, tema al que se dedicaría en exclusividad desde 1960.

Para sus primeros estudios en dicho campo, Cavalli-Sforza tomó muestras de sangre de poblaciones humanas procedentes del valle y las montañas de Parma. Con ello pretendía analizar la deriva genética; es decir, las fluctuaciones aleatorias de las frecuencias genéticas entre una generación y la siguiente. Lógicamente, tales fluctuaciones deberían ser más importantes en poblaciones pequeñas, como los pueblos de las montañas, que en las de gran tamaño, como las ciudades de zonas planas. A partir de datos demográficos —obtenidos de libros parroquiales— y simulaciones por ordenador, Cavalli-Sforza y sus colaboradores consiguieron explicar las variaciones genéticas entre pueblos en función de la densidad de población o la altitud.

Aquellos trabajos demostraron que, al contrario de lo que se creía hasta entonces, la evolución humana no dependía solo de la selección natural: dependía también de la deriva genética, la cual revestía gran importancia. Orgulloso de la concordancia entre sus simulaciones y los datos, Cavalli-Sforza dedicaría su atención al fenómeno durante cincuenta años. De ello dio cuenta en 2004 con la publicación de la obra *Consanguinity, inbreeding, and genetic drift in Italy*, escrita junto con sus colaboradores Antonio Moroni y Gianna Zei. Los autores estimaron también la deriva empleando datos de apellidos en lugar de genes, y constataron que ambos procedimientos daban resultados coherentes.

Genes y poblaciones

A partir de 1960 Cavalli-Sforza se convertiría en un pionero de la aplicación de métodos estadísticos a datos de frecuencias genéticas para inferir árboles evolutivos de poblaciones humanas. Su idea fue que la importancia de la deriva genética implicaba que un árbol filogenético podría reconstruir correctamente la historia de la separación entre poblaciones, algo que no ocurriría si solo interviniese la selección natural. Y, en efecto, en el primer árbol aparecían juntas de manera automática las poblaciones del mismo continente. Cavalli-Sfroza y sus colaboradores obtuvieron en 1988 una correspondencia espectacular entre los árboles filogenético y lingüístico de la humanidad. Dicha asociación aparece porque, en la evolución humana, las poblaciones se fragmentan con frecuencia, y cada fragmento tiende a desarrollar su propia lengua y composición genética.

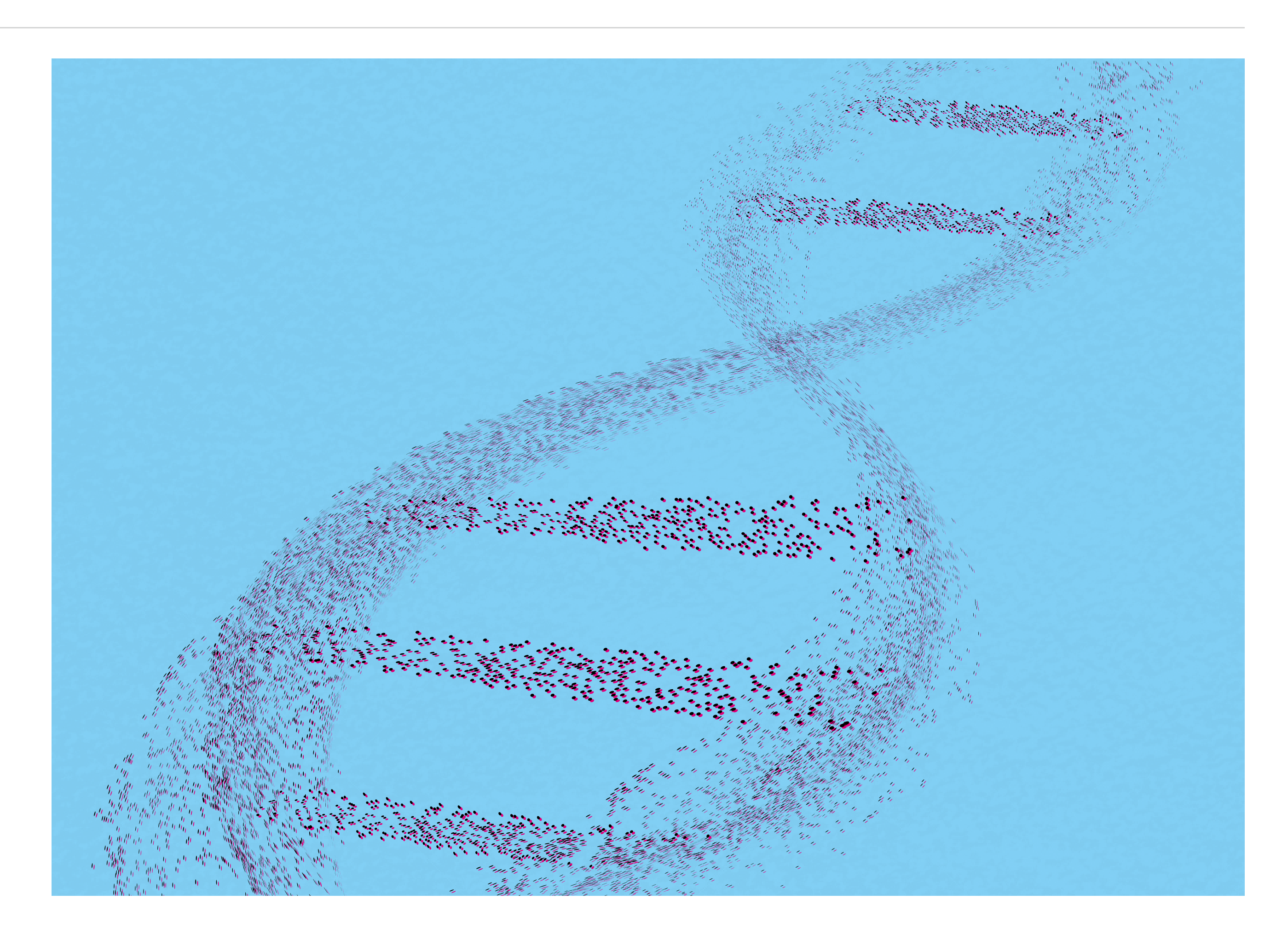
Pero, además de aplicar con éxito sus destrezas matemáticas, Cavalli-Sforza siempre otorgó gran importancia a la obtención de datos empíricos. Entre 1966 y 1985 organizó diez expediciones a África para recopilar datos de poblaciones de pigmeos cazadores-recolectores. Aquellos viajes proporcionaron datos genéticos y antropológicos de enorme utilidad. De ellos, los relativos a las distancias intergeneracionales entre pigmeos fueron aplicados en 2004 a un modelo matemático para estimar la velocidad de las invasiones de poblaciones paleolíticas (es decir, cazadoras-recolectoras).

En 1971 Cavalli-Sforza dejó nuevamente Italia para aceptar una cátedra de genética en Stanford, donde permanecería hasta 2008. El ambiente ideal que encontró allí, rodeado de lingüistas, matemáticos y otros expertos en áreas de su interés, le llevó a rechazar la oferta de una cátedra de antropología en Harvard.

A partir de 1971 Cavalli-Sforza analizó la transición del Mesolítico (Paleolítico final) al Neolítico en Europa. Junto con el arqueólogo Albert Ammerman dedujo de los datos arqueológicos que, hace unos 9000 años, la agricultura y la ganadería comenzaron a propagarse por Europa desde su origen en Oriente Próximo a la velocidad aproximada de un kilómetro al año. Para explicarlo, Cavalli-Sforza aplicó las ideas que había encontrado en un artículo de Fisher durante su estancia en Cambridge. Así nació el modelo de «ola de avance» de la transición neolítica en Europa. Hoy, tanto este modelo como otros basados en él se aplican para entender la velocidad de las transiciones neolíticas y otros fenómenos expansivos en diversos continentes. Su introducción supuso una aportación impresionante, pues proporcionaba una descripción matemática de fenómenos clave acontecidos en la prehistoria de la humanidad.

Evolución cultural

Cavalli-Sforza fue también un pionero en el uso de modelos matemáticos para estudiar la evolución cultural. Sobre ello publicó en 1981, junto con Marcus Feldman, *Cultural transmission and evolution: A quantitative approach*, obra que



se convertiría en una referencia sobre el tema y que hoy en día cuenta con miles de citas. En años recientes, ese tipo de modelos se han combinado con el de la ola de avance para describir de manera unificada la difusión de cultura y de poblaciones.

En 1971 Cavalli-Sforza predijo que, si una ola de poblaciones agrícolas propagó el Neolítico desde el Oriente Próximo a través de Europa, y si a estas poblaciones se incorporaron cazadores-recolectores autóctonos (con genes distintos de los de los agricultores), ello tendría que haber provocado diferencias graduales en la genética de las poblaciones humanas a medida que aumentaba la distancia a Oriente Próximo. Dichas diferencias son las llamadas «clinas», o gradientes genéticos, las cuales fueron detectadas por Cavalli-Sforza, Paolo Menozzi y Alberto Piazza a partir de las frecuencias genéticas de las poblaciones europeas actuales. La hipótesis, publicada en *Science* en 1978, fue puesta a prueba décadas después, cuando se hizo posible analizar los genes de individuos que vivieron hace miles de años. Ello confirmó las tesis de Cavalli-Sforza, en el sentido de que la difusión del Neolítico fue básicamente debida a la expansión de las poblaciones agrícolas y no a la transmisión cultural (es decir, a la conversión de cazadores-recolectores en agricultores).

En 1994, nuevamente junto con Menozzi y Piazza, publicó una obra monumental titulada *The history and geography of human genes*, hoy convertida en la referencia estándar sobre variación genética. El libro incluye una multitud de datos genéticos, arqueológicos, lingüísticos e históricos, lo que da fe de la inmensa erudición de Cavalli-Sforza.

En 2005 Cavalli-Sforza y sus colaboradores demostraron que, en las poblaciones humanas actuales, la disminución de la diversidad genética a medida que aumenta la distancia a África puede explicarse como otro efecto de la deriva; en este caso, de las primeras poblaciones de humanos modernos que salieron de África. En su último artículo, publicado en 2012, sugirió que la disminución de la diversidad fonémica en los idiomas actuales a medida que aumenta la distancia a África podría deberse al mismo proceso. Esta y muchas otras ideas seguirán siendo investigadas durante décadas, en la estela de la inmensa obra de este genial investigador.

Joaquim Fort *es catedrático de física en la Universidad de Gerona, premio ICREA Academia en humanidades y antiguo colaborador de Luigi Luca Cavalli-Sforza.*

PARA SABER MÁS

Genetic drift in an Italian population. Luigi Luca Cavalli-Sforza en *Scientific American*, agosto de 1969.

La evolución de la cultura. Luigi Luca Cavalli-Sforza. Anagrama, 2017.

¿Quiénes somos? Historia de la diversidad humana. Luigi Luca y Francesco Cavalli-Sforza. Crítica, 2015.

Genes, pueblos y lenguas. Luigi Luca Cavalli-Sforza. Crítica, 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Genes, pueblos y lenguas. Luigi Luca Cavalli-Sforza en *IyC*, enero de 1992.

Modelos matemáticos de la transición neolítica. Joaquim Fort en *IyC*, julio de 2015.

EVOLUCIÓN HUMANA

¿Qué impulsó la evolución de un cerebro voluminoso?

Según un novedoso análisis computacional, los factores ecológicos, más que los sociales, desempeñaron un papel determinante

RICHARD McELREATH

La mayoría de los organismos poseen un cerebro pequeño y, a pesar de ello, son capaces de prosperar. Se trata de un órgano costoso de producir y mantener, y el del linaje humano resulta tan voluminoso que, cuando se forma, exige una gran inversión de nuestro metabolismo. Su crecimiento se detiene a la edad de diez años, mucho antes de que el cuerpo alcance la madurez física. Algunos autores han propuesto que el coste del rápido desarrollo cerebral es la causa del retraso en el crecimiento del cuerpo. Otros primates no dan tal prioridad al cerebro. El patrón de desarrollo cerebral humano es singular, ya que nuestro cuerpo se mantiene más pequeño, más vulnerable y menos productivo durante más tiempo. La respuesta a ese enigma puede alcanzarse si averiguamos de qué modo el cerebro ayudó a la supervivencia y la reproducción de nuestros antepasados. En un estudio reciente publicado en *Nature*, Mauricio González-Forero y Andy Gardner, de la Universidad de Saint Andrews, han analizado el papel de diferentes factores como posibles causas de nuestro cerebro inusualmente grande, y han determinado si tales factores podrían contribuir a los cambios que se producen en el tamaño del cerebro y del cuerpo a medida que crecemos.

Un modelo evolutivo más preciso

Diferentes hipótesis de tipo ecológico, social y cultural explican cómo evolucionó el voluminoso cerebro humano. Una de ellas relaciona la ecología con la inteligencia, y sugiere que las dificultades ambientales, que influyen sobre la búsqueda de alimento, son fundamentales en la evolución del tamaño cerebral. Otra, la hipótesis de la inteligencia social, señala que la clave reside en los retos que representan la competencia y la cooperación con otros miembros de la misma especie. Por último, la hipótesis de la inteligencia cultural combina estas dos ideas y propone que el aprendizaje social de habilidades ecológicamente relevantes explica la enorme inversión de recursos que nuestro linaje destina al cerebro.

Hasta ahora, la comprobación de estas hipótesis se ha basado principalmente en estudios comparativos en los que se correlacionan distintos rasgos del cerebro, como el tamaño (una aproximación de la inteligencia), con características como la cognición, la ecología y la vida en grupo. Estos análisis de regresión que intentan identificar las variables relacionadas con el tamaño cerebral han sido muy valiosas para matizar algunas teorías y mejorar la medición de los datos que se necesitan.

Sin embargo, a veces generan resultados complicados y confusos. Los cambios en el crecimiento del cerebro y del cuerpo pueden tener un efecto recíproco, uno sobre el otro, por diferentes razones, como las limitaciones metabólicas y las necesidades de producción de energía. Es decir, las interacciones entre el cerebro y el cuerpo resultan complejas y no son lineales. Por consiguiente, los resultados de los análisis de regresión son difíciles de interpretar porque no pueden vincularse directamente con un modelo evolutivo. Los investigadores deberíamos dejar de teorizar usando un conjunto de modelos mientras que analizamos datos con otro. Pasar de modelos puramente estadísticos, como las regresiones, a estudios que verifiquen los modelos evolutivos podrían ser la clave para avanzar en el futuro.

El estudio de la evolución del cerebro humano debe basarse necesariamente en la observación directa, ya que no podemos hacer experimentos que analicen el papel de cada una de las variables. Pero a partir de la observación es difícil determinar cómo afectan los cambios en los diferentes factores. Cuando a Ronald Fisher, eminente biólogo evolutivo y estadístico de principios del siglo xx, se le preguntó cómo podría inferirse la causalidad en estos casos, su respuesta fue que debían construirse teorías complejas.

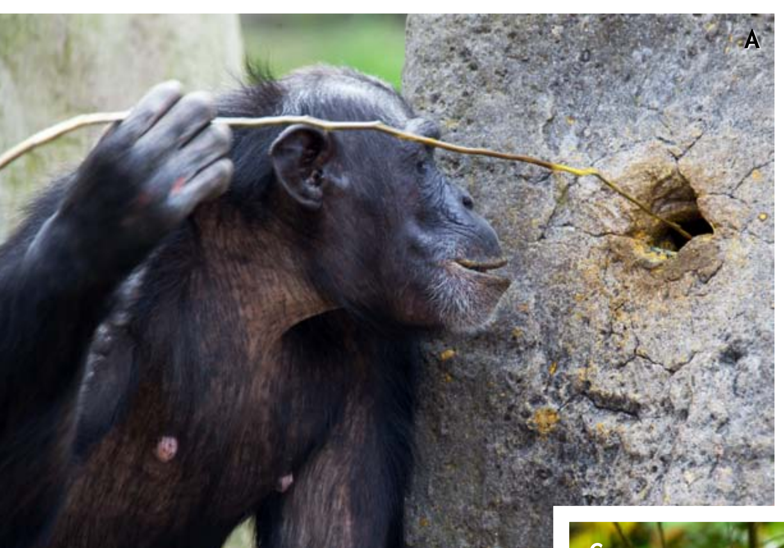
El funcionamiento de los coches puede ser una buena analogía cuando se estudian este tipo de sistemas. A través de un análisis de regresión resultaría difícil entender el diseño de un coche de carreras y saber cómo varía el tamaño del motor en función de otras características, como el peso y la forma del coche. En cambio, podríamos crear modelos que utilizaran las leyes físicas para predecir combinaciones óptimas de las variables bajo diferentes circunstancias. Entender la evolución del cerebro supone un reto similar, en el que los rasgos de un organismo coevolucionan bajo distintas restricciones biológicas.

González-Forero y Gardner han seguido el consejo de Fisher y, para abordar este problema, han generado un modelo complejo que investiga la evolución del cerebro. La creación de modelos evolutivos del cerebro puede proporcionar predicciones más precisas sobre su tamaño, las cuales, además, pueden contrastarse fácilmente. Y dado que los modelos utilizan características biológicas, es fácil entenderlos. Cuando los resultados del modelo no coinciden con los datos reales del tamaño cerebral, pueden revisarse los supuestos biológicos para comprender por qué el modelo falló.

El peso de los retos ambientales

En el modelo computacional de los autores, a medida que los humanos crecemos, seguimos un programa de inversión metabólica en la construcción del cerebro y del cuerpo. El aumento en el tamaño cerebral proporciona mayores destrezas, y el incremento del tamaño corporal facilita la conversión de esas destrezas en energía. Estas también contribuyen al éxito reproductivo. Se han generado diferentes escenarios de crecimiento que guardan relación con determinadas predicciones del tamaño cerebral y corporal.

En el modelo también se ha introducido el coste metabólico de mantener el cuerpo y el cerebro. Se han utilizado valores de metabolismo que ya están establecidos y que proporcionan información, por ejemplo, sobre cómo varía la tasa metabólica en función del tamaño de un organismo. Tras fijar el coste







EN COMPARACIÓN CON OTROS SIMIOS, como los chimpancés, los humanos poseemos un cerebro singularmente grande y de crecimiento rápido. La forma en que se adquirió este tipo de crecimiento es motivo de debate. Un análisis reciente basado en modelos computacionales aborda la importancia relativa de distintos factores en la evolución del tamaño cerebral. Se ha concluido que los factores ecológicos, como la disponibilidad y la búsqueda de alimento (*A*), son más relevantes que los sociales, como la cooperación (*B*) o la competencia entre individuos (*C*).

metabólico, los autores han analizado la importancia de los diferentes factores modificando el peso relativo de cada uno de ellos y evaluando el efecto que tenían sobre los tamaños estimados del cerebro y del cuerpo. Han explorado cuatro tipos de factores: ecológico (un individuo contra la naturaleza), cooperativo-ecológico (nosotros contra naturaleza), competitivo entre individuos (un individuo contra otro) y competitivo entre grupos (nosotros contra ellos). Por último, han determinado qué combinación de factores pudo generar un patrón hipotético de crecimiento cerebral y corporal similar al que presentan los humanos a lo largo de la vida.

La conclusión del análisis de González-Forero y Gardner es que la inteligencia ecológica es el factor clave que determina el crecimiento del tamaño cerebral y corporal. Los mejores ajustes entre las predicciones del modelo y los patrones reales del crecimiento humano se lograban cuando se asignaba un peso del 60 por ciento a los factores ecológicos.

En cambio, los factores sociales eran menos relevantes a la hora de determinar los patrones de crecimiento. La competencia entre individuos o entre grupos está relacionada con el desarrollo de un cerebro grande y un tamaño corporal más pequeño que el valor real. Cuando la competencia es alta aumentan también las capacidades del individuo, pero ello puede conllevar un menor rendimiento en la obtención de energía. Esta paradoja sucede porque aquello por lo que los individuos están compitiendo se vuelve más difícil de conseguir. Así, si un individuo desarrolla una mayor capacidad para obtener energía, su ventaja puede neutralizarse porque otros individuos con los que compite también pueden desplegar las mismas capacidades. En cambio, enfrentarse a las dificultades ecológicas no provoca que se creen otras nuevas, sino que, cuando estas son superadas, se obtiene un mayor rendimiento energético. El modelo que mejor encajaba solo daba un peso del 10 por ciento a la competencia entre grupos.

Se descubrió que la cooperación producía más de un efecto. El mejor modelo asignaba un 30 por ciento de peso a la

cooperación. Sin embargo, esta podía dar lugar a una reducción del tamaño cerebral, ya que algunos individuos podrían aprovecharse de la inteligencia de los demás. En algunos animales se han hallado pruebas de este efecto.

Los factores ecológicos destacan como los más importantes. Pero los autores admiten que el modelo no aborda el posible papel de la inteligencia cultural, ya que no han incluido en él la dinámica cultural. Los resultados que obtienen son coherentes con la hipótesis de la inteligencia cultural, pero la existencia de esa posible relación es ahora mismo mera especulación.

Algunos de los resultados del modelo que predicen el tamaño son sensibles a diferentes detalles, como la relación entre una determinada habilidad y el éxito reproductivo. Sin embargo, ello nos proporciona una magnífica oportunidad para entender algunas de las inesperadas implicaciones que tenían las hipótesis propuestas sobre cuáles eran los factores que influían en la evolución del cerebro. También nos permite definir los objetivos de futuros trabajos. Por ejemplo, el modelo mejoraría si incorporase más datos sobre la tasa de adquisición de las habilidades con la edad, una información de la que hoy apenas disponemos.

Finalmente, debido a que el modelo se propone explicar el tamaño del cerebro solo en los humanos, los resultados no ayudan a entender la evolución de la inteligencia en otras especies. Sin embargo, las implicaciones metodológicas de este trabajo son enormes. Este tipo de marco general para investigar y predecir valores a partir de un conjunto de variables que coevolucionan no solo en adultos, sino también a lo largo de la vida, nos permitirá comprobar de forma más precisa otras predicciones, con independencia de la especie que se analice.

Richard McElreath *es profesor del Departamento de Comportamiento, Ecología y Cultura humanas del Instituto Max Planck de Antropología Evolutiva, en Leipzig.*

Artículo original publicado en *Nature* vol. 557, págs. 496-497, 2018. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2018

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Humans have evolved specialized skills of social cognition: The cultural intelligence hypothesis. Esther Herrmann et al. en *Science*, vol. 317, n.º 5843, págs. 1360-1366, septiembre de 2007.
Metabolic costs and evolutionary implications of human brain development. Christopher W. Kuzawa et al. en *Proc. Natl Acad. Sci. USA*, vol. 111, págs. 13010-13015, septiembre de 2014.
Inference of ecological and social drivers of human brain-size evolution. Mauricio González-Forero y Andy Gardner en *Nature*, vol. 557, págs. 554–557, junio de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Tamaño cerebral e inteligencia. Maddalena Bearzi y Craig Stanford en *IyC*, diciembre de 2010.

BIOLOGÍA EVOLUTIVA

¿Es predecible la evolución?

Un estudio con insectos revela que, en ciertos casos, la evolución sí puede predecirse. El grado de predictibilidad depende del número y la complejidad de las presiones selectivas

VÍCTOR SORIA CARRASCO

La aspiración última de toda disciplina científica es la proposición de teorías que permitan realizar predicciones comprobables por medio del experimento. Sin embargo, y a diferencia de otras ramas de la ciencia, la biología evolutiva ha sido considerada desde sus inicios una ciencia más descriptiva que predictiva. El propio Charles Darwin asumió desde un principio que la selección natural operaría tan despacio que sería prácticamente imposible observar cambios evolutivos sustanciales en escalas de tiempo humanas. De este modo, el estudio de la evolución estaría condenado a ser un ejercicio inductivo basado en la observación del registro fósil y comparaciones anatómicas.

No obstante, se ha demostrado que lo anterior no es totalmente cierto. Hoy sabemos que, en algunos casos, la evolución puede tener lugar con rapidez suficiente para observar sus efectos. Ello ha abierto la puerta a estudiar su grado de predictibilidad, cuestión en la que recientemente he tenido el placer de trabajar junto con otros colaboradores en una investigación liderada por Patrik Nosil, de la Universidad de Sheffield. Nuestros resultados, publicados este año en la revista *Science*, ponen de manifiesto que, si bien nuestra capacidad predictiva se ve limitada cuando las presiones selectivas son numerosas y varían con el tiempo, hay algunos aspectos de la evolución que sí pueden predecirse con fiabilidad.

Evolución: azar y determinismo

Una de las grandes preguntas de la biología evolutiva es si la evolución es predecible y, de serlo, hasta qué punto. En este sentido, la metáfora más célebre es la enunciada por Stephen Jay Gould, eminente evolucionista de Harvard ya fallecido, en su popular libro *La vida maravillosa*, publicado por primera vez en 1989: si pudiéramos rebobinar la «cinta de la vida» hasta sus orígenes y reproducirla de nuevo, ¿evolucionarían los mismos organismos?

Como otros paleontólogos, Gould creía que la evolución era impredecible debido a la enorme influencia del azar. Por otro lado, desde una perspectiva determinista, predecir el resultado de la evolución sería posible en teoría, si bien difícil en la práctica: el altísimo número de variables implicadas, la complejidad de sus interrelaciones y la dificultad para obtener datos cuantitativos durante largos períodos de tiempo nos impedirían realizar avances sustanciales. A pesar de todo, cada vez más estudios sugieren que no se trata de





EL INSECTO PALO *Timema cristinae*, endémico de las montañas de Santa Ynez, en California, presenta tres variedades de color: verde (*izquierda*), verde rayado (*centro*) y marrón (*derecha*). A fin de evaluar la predictibilidad de la teoría de la evolución, un estudio reciente ha analizado cómo ha cambiado la proporción de *T. cristinae* de cada color a lo largo de los últimos 25 años.

MORITZ MUSCHICK

una cuestión de todo o nada: el aspecto principal reside en cuantificar la contribución relativa de los procesos deterministas y los aleatorios.

El mayor obstáculo para el estudio de la evolución se halla en el elevado número de generaciones requeridas para poder observar la adaptación como efecto de la selección. En este sentido, un enfoque prometedor consiste en acumular series de datos a lo largo del tiempo con el objetivo de cuantificar hasta qué punto la evolución pasada puede usarse para predecir la futura. Uno de los ejemplos más famosos de este enfoque fue el seguimiento de los pinzones de las Galápagos que, durante más de 40 años, llevaron a cabo Peter y Rosemary Grant, de la Universidad de Princeton.

El trabajo de los Grant, iniciado en los años setenta del pasado siglo, demostró que la selección natural puede causar cambios en la forma de los organismos en períodos de tiempo mucho más cortos de lo que se suponía. Sin embargo, sus estudios también indicaron que la predictibilidad de la evolución morfológica era muy baja, debido fundamentalmente a variaciones irregulares en las presiones selectivas a lo largo del tiempo. A pesar de todo, la baja predictibilidad observada por los Grant podría también deberse a limitaciones técnicas: predecir la evolución en regímenes selectivos complejos tal vez requiera mucha más información que aquella de la que podemos disponer.

El color de los insectos palo

Nuestro trabajo fue el fruto de la recopilación de datos de frecuencias de morfotipos de color (es decir, variedades con distintos colores) en insectos palo (*Timema cristinae*) durante 25 años. *T. cristinae* es una especie endémica de los chaparrales mediterráneos de las montañas de Santa Ynez, en California. Son herbívoros, pequeños (entre 2 y 3 centímetros de longitud), ápteros y se dispersan muy poco, con lo que prácticamente completan su ciclo vital en un mismo arbusto.

Esta especie presenta tres morfotipos de color principales: verde, verde rayado (con una franja dorsal de color claro) y marrón. Estos morfotipos les permiten camuflarse y evitar a los depredadores. Los insectos con colores distintos (verde o marrón) se camuflan mejor en diferentes partes de la planta (en las hojas o en la corteza, respectivamente). Por su parte, el patrón rayado confiere un mejor camuflaje en las hojas de cierto tipo de arbustos, pero no de otros.

Las primeras investigaciones sobre las frecuencias de estos morfotipos fueron efectuadas a principios de los años noventa por Cristina Sandoval, quien por entonces hacía su doctorado en la Universidad de California en Santa Bárbara. Siguiendo sus pasos, Nosil comenzó a estudiar *T. cristinae* a principios de los años 2000, motivado por el potencial para estudiar la especiación como resultado de la adaptación a distintas plantas. Sandoval primero, y Nosil después, acumularon datos sobre la frecuencia de los morfotipos en varias localidades durante décadas sin tener un plan concreto en mente, pero con la esperanza de que en el futuro fuese posible extraer algún patrón.

Juntar las piezas

Durante los últimos años, los llamados modelos autorregresivos de media móvil han ganado cada vez más popularidad. Estos métodos permiten usar la fracción inicial de una serie temporal de datos para predecir los valores siguientes. Al comparar tales predicciones con los valores reales, puede evaluarse la capacidad predictiva del modelo. Nosil se percató de que las frecuencias de morfotipos registradas durante años eran el sustrato ideal para usar este tipo de métodos y, por tanto, poner a prueba la predictibilidad de la evolución.

En lo que respecta a nuestro trabajo, al llevar a cabo los análisis observamos que, mientras que la frecuencia de los insectos marrones era poco predecible,

Datos usados para la predicción
Datos eliminados
Valor
Tiempo
Valores observados
Valores predichos

DATOS PASADOS Y FUTUROS: Los «modelos autorregresivos de media móvil» permiten evaluar la capacidad predictiva de una teoría. En el ejemplo genérico representado aquí, se ha usado una fracción inicial de los datos disponibles (*puntos negros*) para predecir el comportamiento de la serie a partir del instante marcado por la línea roja. La comparación entre las observaciones eliminadas (*puntos grises*) y las predicciones (*puntos amarillos*) permite evaluar el poder predictivo del modelo.

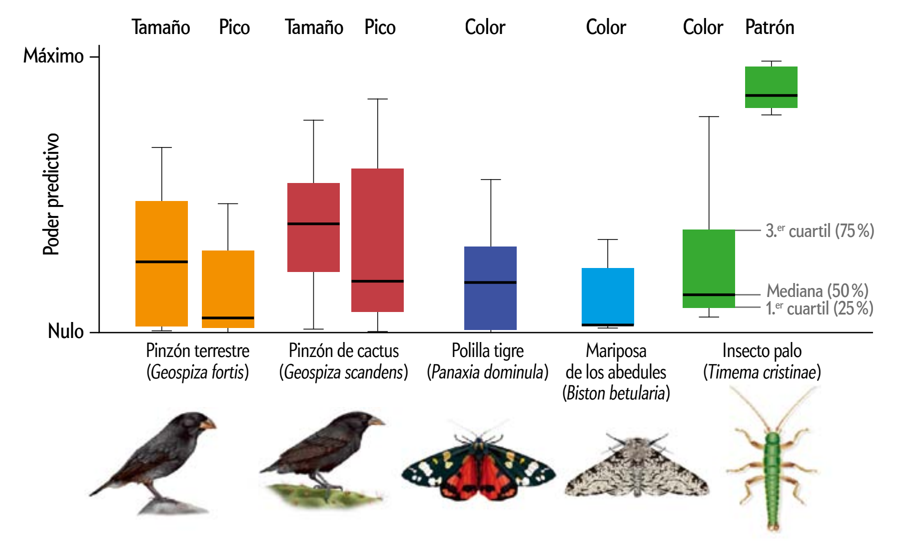
la de los rayados lo era en muy alto grado. ¿Podría deberse a que los regímenes selectivos para el color (verde o marrón) y para el patrón (presencia o ausencia de raya) eran diferentes?

Sobre el color, planteamos la hipótesis de que, en años secos y cálidos, las plantas producirían menos hojas y tendrían una mayor superficie de corteza expuesta, lo que favorecería a los insectos marrones. Sin embargo, ocurre que estos insectos presentan también una menor tolerancia al calor y una mayor resistencia a las infecciones fúngicas, lo que les otorga ventaja en años húmedos y fríos. Así pues, el color se halla sujeto a fuerzas selectivas antagónicas, variables y ligadas a cambios en el clima.

Por el contrario, nuestra hipótesis para el patrón era que este quedaría determinado por un régimen mucho más sencillo. La presión selectiva dominante en este caso sería la depredación por las aves, que tienden a alimentarse del morfotipo más frecuente en una zona determinada. De esta manera, el morfotipo más raro un año tendría ventaja y se convertiría en el más frecuente el año posterior, y así sucesivamente. Este vaivén cíclico de la presión selectiva resultaría en oscilaciones regulares y predecibles en la frecuencia de los morfotipos.

Demostrar lo anterior y, además, que los genes implicados en el color y el patrón se hallaban bajo el efecto de la selección natural requirió la combinación de estudios observacionales, experimentos de campo y el análisis de genomas de miles de individuos. Para finalizar, nos preguntamos cuán representativos serían nuestros resultados. Para ello reanalizamos otras series temporales de datos disponibles, como las relativas a los pinzones de las Galápagos o a la mariposa de los abedules. Como era esperable —y en confirmación de nuestra hipótesis—, la predictibilidad resultó ser baja en todos ellos, puesto que tales casos se encuentran sometidos a diversas formas de selección que, además, varían con el tiempo.

Nuestro estudio indica que la predictibilidad de la evolución depende en gran medida de nuestra capacidad para vaticinar los factores causales (es decir, las presiones selectivas) y de nuestra comprensión de los mecanismos evolutivos. El futuro pasa por potenciar estudios evolutivos a largo plazo y experimentos que consideren múltiples fuerzas selectivas en conjunto y que permitan refinar nuestros modelos. Si el objetivo es mejorar nuestra capacidad para predecir la evolución, la obtención de grandes cantidades de datos y el desarrollo de modelos más realistas nos indican el camino que debemos seguir.



CUANTIFICAR LA PREDICTIBILIDAD: Los métodos autorregresivos han permitido evaluar la predictibilidad de varios procesos evolutivos en distintas especies para las que existen series temporales de datos. En la mayoría de los casos, la gran variabilidad de las presiones selectivas implica una predictibilidad baja o moderada. En el caso de *T. cristinae*, sin embargo, se observa un poder predictivo bajo para el color, pero muy elevado para el patrón. La distribución de valores en el eje vertical se representa mediante «diagramas de caja», que indican el valor más probable (mediana) y la incertidumbre de las estimaciones de predictibilidad mediante cuartiles (25 % y 75 %).

Víctor Soria Carrasco *investiga en el Departamento de Ciencias de Animales y Plantas de la Universidad de Sheffield.*

PARA SABER MÁS

40 years of evolution: Darwin's finches on Daphne Major island. Peter R. Grant y B. Rosemary Grant. Princeton University Press, 2014.

La vida maravillosa: Burgess Shale y la naturaleza de la historia. Stephen Jay Gould. Crítica, 2018 (última edición).

Natural selection and the predictability of evolution in *Timema* stick insects. Patrik Nosil et al. en *Science*, vol. 359, págs. 765-770, febrero de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

La selección natural y los pinzones de Darwin. Peter R. Grant en *IyC*, diciembre de 1991.

La evolución de la vida en la Tierra. Stephen Jay Gould en *IyC*, diciembre de 1994.

Evolución en las fronteras de la vida. Rüdiger Riesch y Martin Plath en *IyC*, enero de 2018.

NEUROCIENCIA

EL ESTRECHO NEXO ENTRE LA INMUNIDAD Y EL CEREBRO

El sistema inmunitario, que se creía disociado del cerebro, interviene estrechamente en su funcionamiento

Jonathan Kipnis

Ilustración de Mark Ross



Jonathan Kipnis es profesor y catedrático de neurociencia y director del Centro de Inmunología Cerebral y Glía de la Facultad de Medicina de la Universidad de Virginia. Su investigación gira en torno a las interacciones entre los sistemas nervioso e inmunitario.



DURANTE DÉCADAS, LOS MANUALES DE ANATOMÍA ENSEÑABAN QUE LOS DOS sistemas más complejos del organismo, el nervioso y el inmunitario, coexistían casi aislados el uno del otro. Según explicaban, el cerebro se dedicaba a dirigir las funciones corporales, mientras que el sistema inmunitario se encargaba de su defensa. En las personas sanas nunca coincidían. Solo en ocasiones, a raíz de una enfermedad o un traumatismo, las células inmunitarias penetraban en el encéfalo, para atacarlo.

Pero, en los últimos años, una avalancha de descubrimientos ha revolucionado el conocimiento acerca de ambos sistemas. Todo indica que interactúan de forma habitual, tanto en la enfermedad como en la salud. Así, el sistema inmunitario contribuye a sanar las lesiones encefálicas, por ejemplo. También ayuda a soportar el estrés y facilita funciones esenciales del cerebro, como el aprendizaje y el comportamiento social. Además, se le podría considerar como un órgano de vigilancia, que detecta microbios en el seno del cuerpo y a su alrededor e informa al cerebro, tal y como los ojos le envían información visual o los oídos le transmiten señales auditivas. En otras palabras, el cerebro y el sistema inmunitario no solo se encuentran con más frecuencia de lo supuesto, sino que están íntimamente enlazados.

Aún en pañales, el floreciente campo de la neuroinmunología empieza a dejar patente que la respuesta cerebral a la información inmunitaria y el modo en que esta controla y afecta los neurocircuitos podría ser la clave para comprender muchas enfermedades neurológicas, desde el autismo hasta el alzhéimer, y concebir tratamientos contra ellas. Los intentos por tratar dichos trastornos han dado al traste porque la mayoría de los fármacos no consiguen penetrar con facilidad en el cerebro. Los descubrimientos de esta joven disciplina abren la posibilidad de que actuar sobre el sistema inmunitario sea una táctica más eficaz.

CONOCIMIENTOS ADQUIRIDOS

Para comprender la importancia de esos descubrimientos, conviene conocer la estructura y el funcionamiento del cerebro y del sistema inmunitario. El encéfalo es el superordenador que rige el organismo. En conjunción con la médula espinal y los diversos pares (nervios) craneales, integra el sistema nervioso central (SNC), que controla todas las funciones corporales. Ante tamaña responsabilidad, no sorprende la extrema complejidad del órgano pensante. Sus unidades funcionales básicas son las neuronas, que ocupan en torno a la mitad de su volumen. El cerebro humano alberga cerca de 100.000 millones, conectadas por unos 100 billones de uniones (sinapsis). Las neuronas y la glía, un conjunto de células no neuronales, conforman el parénquima cerebral, el tejido encargado de procesar la información. Otros integrantes destacados son las células estromales, que dan soporte físico a los tejidos del parénquima, y las células endoteliales, que componen los vasos sanguíneos. Estos irrigan el cerebro y

EN SÍNTESIS

El saber tradicional sostenía que el cerebro y el sistema inmunitario no interactúan en la persona sana.

En cambio, los cuantiosos datos recabados en los últimos años demuestran la íntima relación existente entre ambos.

Los hallazgos del naciente campo de la neuroinmunología, aún con mucho por explorar, podrían ofrecer nuevas perspectivas sobre las enfermedades neurológicas y su tratamiento.

delimitan la barrera hematoencefálica, que limita el paso al SNC de sustancias provenientes de otras zonas del cuerpo.

El sistema inmunitario consta de dos componentes básicos, la inmunidad innata y la adquirida. El componente innato es el más primitivo, pues surgió hace unos 1000 millones de años en las células primigenias para detectar y aniquilar al enemigo con rapidez, pero sin gran precisión. Constituye la primera línea de defensa frente a los patógenos y despliega barreras físicas y químicas para detenerlos, además de células para exterminarlos. Cuando el sistema innato inicia la respuesta inflamatoria, los leucocitos acuden en tropel al foco infeccioso y secretan proteínas que generan calor e hinchazón para confinar y destruir a los patógenos. El sistema adquirido, que evolucionó después, se compone sobre todo de linfocitos T y B, leucocitos capaces de reconocer patógenos concretos y desencadenar un ataque específicamente contra ellos. En condiciones ideales, las células de la inmunidad adquirida combatirían solo a los patógenos externos, sin afectar a las proteínas y las células del organismo. Pero en casi el uno por ciento de la población, la inmunidad adquirida se desbarajusta y ataca a células de tejidos propios. Aparecen así las enfermedades autoinmunitarias, como la esclerosis múltiple, la artritis y ciertas formas de diabetes, entre otras muchas. Con todo, la eficacia de este sistema, que ataca en exclusiva a los intrusos en cerca del 99 por ciento de la población, es impresionante.

Durante mucho tiempo se pensó que el sistema inmunitario operaba mediante la simple distinción entre los componentes propios del cuerpo y los ajenos, hasta que empezaron a surgir teorías más complejas. En los años noventa del pasado siglo, Polly Matzinger, del Instituto Nacional de Alergia y Enfermedades Infecciosas de Estados Unidos, propuso que el sistema inmunitario no solo reconoce a los invasores, sino que también daña los tejidos. Su planteamiento se vio respaldado luego por el descubrimiento de moléculas que los tejidos dañados o infectados desprendían. Tales moléculas captan la atención de las células inmunitarias, lo que desencadena una cascada de acontecimientos que activan el sistema defensivo, atraen sus células hacia el foco de la lesión y acaban (o intentan acabar) con el invasor o con la lesión causante de la alarma. Por otra parte, los experimentos han demostrado que la supresión de la inmunidad adquirida acelera la aparición y la proliferación de los tumores y retrasa la cicatrización de los tejidos dañados. Ello indica que el sistema inmunitario no tiene por misión exclusiva proteger el organismo contra los invasores externos, sino que esta es mucho más amplia: la regulación de los tejidos corporales con el fin de mantener el orden frente a todo tipo de agresiones, procedan del exterior o del interior.

Hasta hace poco existía la convicción de que el cerebro quedaba fuera de su ámbito de actuación. Ya en los años veinte, se observó que, si bien el cerebro sano alberga células inmunitarias propias del SNC (la microglía), no suele contener células defensivas periféricas que provengan de otras partes del cuerpo. La barrera hematoencefálica las mantiene fuera. En los años cuarenta, el biólogo Peter Medawar, galardonado con el premio Nobel, demostró que el organismo tarda más en rechazar el tejido extraño implantado en el cerebro que en otras partes. Sostenía que el cerebro es un órgano «inmunoprivilegiado», insensible al sistema inmunitario. No obstante, en el parénquima y la médula espinal de los pacientes aquejados por infecciones o lesiones encefálicas sí aparecen células inmunitarias periféricas. Y los estudios en ratones demuestran que estas células causan la parálisis debilitante asociada a la enfermedad. A la vista de estos hallazgos, se pensó que el cerebro y el sistema inmunitario no guardaban ninguna relación entre sí, salvo en aquellas situaciones patológicas que posibilitan la entrada de células inmunitarias al SNC, donde agreden a las neuronas.

(No se conoce la manera exacta en que las células inmunitarias traspasan la barrera hematoencefálica en estas circunstancias. Es posible que la barrera no actúe como debiera en caso de enfermedad del SNC, de tal suerte que las células inmunitarias logren franquearla. En un trabajo fundamental publicado en 1992, Lawrence Steinman, de la Universidad Stanford, y sus colaboradores observaron que, en ratones con un trastorno parecido a la esclerosis múltiple, las células inmunitarias periféricas producen integrina $\alpha 4 \beta 1$, una proteína que les permite atravesar la barrera. Un medicamento que inhibe la interacción entre la integrina y las células endoteliales, el natalizumab, es uno de los tratamientos más potentes para los enfermos con esclerosis múltiple.)

Ratones carentes de inmunidad adquirida mostraron alteraciones del comportamiento en el aprendizaje espacial, así como del comportamiento social

Si bien la teoría de que el cerebro y el sistema inmunitario llevan vidas separadas se impuso durante décadas, siempre hubo escépticos. Algunos se preguntaban por qué, si el sistema inmunitario es la principal fuerza de combate contra los patógenos, el cerebro iba a renunciar a él. Los partidarios de la teoría alegaban que la barrera hematoencefálica veta el paso a la mayoría de patógenos, por lo que el cerebro no precisa dar cabida al sistema inmunitario, máxime si su presencia puede causar problemas a sus delicadas neuronas. Los escépticos recalcaban que diversos virus, bacterias y parásitos penetran en el SNC. Y lejos de permanecer impasible a esas irrupciones, el sistema inmunitario afluye masivamente para combatir al invasor. La escasa presencia de patógenos en el órgano gris tal vez no se deba, pues, a la eficacia de la barrera hematoencefálica, sino a la capacidad del sistema inmunitario para acabar con ellos. En efecto, los estudios han demostrado que los pacientes inmunodeprimidos sufren complicaciones que afectan a menudo al SNC.

REESCRIBIR LOS LIBROS DE TEXTO

Con el tiempo, esos argumentos y una creciente revalorización del papel del sistema inmunitario en la reparación de los tejidos dañados llevaron a revisar su cometido en el SNC. El exa-

Relación neuroinmunitaria

Durante mucho tiempo se pensó que el cerebro sano se hallaba fuera del alcance del sistema inmunitario. El encéfalo posee células inmunitarias propias, la microglía, pero en condiciones normales no alberga células defensivas procedentes de otras partes del organismo. La barrera hematoencefálica (*inserto*) impide su entrada. Pero hallazgos recientes demuestran que el sistema inmunitario no solo es muy activo en el cerebro sano, sino esencial para su funcionamiento.

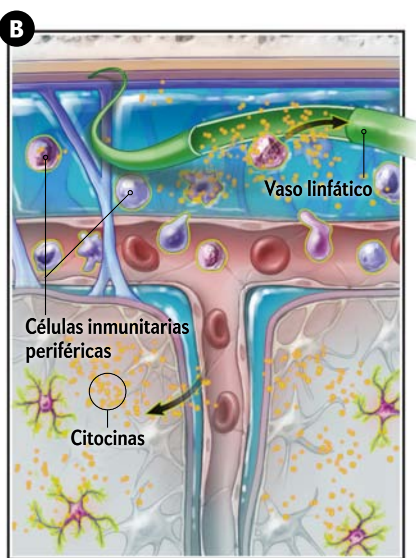
BARRERA HEMATOENCEFÁLICA

Los vasos sanguíneos que irrigan el encéfalo se componen de células endoteliales. Estas se encuentran estrechamente unidas para bloquear el paso al parénquima de multitud de sustancias y elementos, entre ellos, las células inmunitarias periféricas. Refuerzan la barrera ciertas células, los astrocitos, y una estructura denominada membrana basal.

SORTEAR LA BARRERA

Hasta hace poco se pensaba que la función básica de las meninges (las membranas que rodean al parénquima) era albergar el líquido cefalorraquídeo, encargado de proteger mecánicamente el encéfalo **A**. Nuevos hallazgos revelan mayor complejidad **B**. Las meninges contienen vasos linfáticos, que eliminan toxinas y otros desechos del parénquima y pueden transmitir información sobre infecciones cerebrales al sistema inmunitario. Las meninges también albergan células inmunitarias periféricas capaces de comunicarse con el cerebro mediante unas proteínas que sintetizan, las citocinas. Desde las meninges, el líquido cefalorraquídeo penetra en el parénquima por los espacios que circundan los vasos sanguíneos que irrigan el encéfalo, por lo que pueden transportar citocinas desde las células inmunitarias periféricas hasta el interior del cerebro e influir en el comportamiento de las neuronas.





DAVID CHENEY

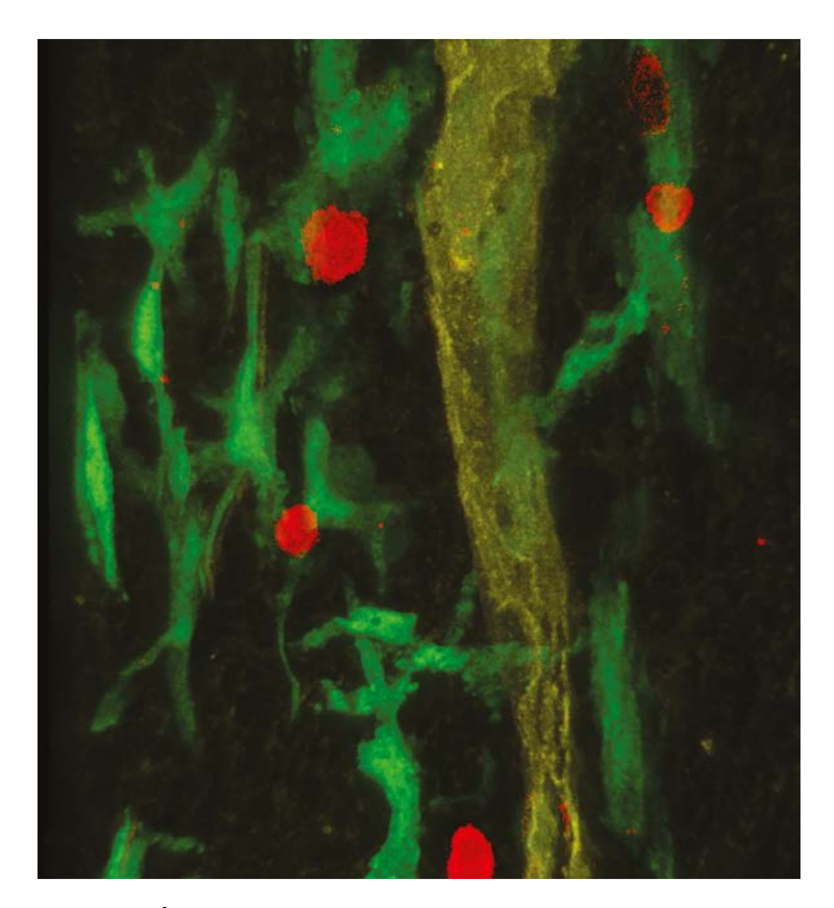
men atento del SNC de ratas y ratones con lesiones medulares reveló la infiltración de multitud de células inmunitarias. En experimentos llevados a cabo a finales de los noventa, Michal Schwartz, del Instituto Weizmann de Ciencias, en Rehovot, reveló que la eliminación de las células inmunitarias tras una lesión del SNC agravaba la destrucción de las neuronas y deterioraba la actividad cerebral, mientras que la estimulación de la respuesta inmunitaria mejoraba la supervivencia neuronal. En años posteriores, los estudios encabezados por Stanley Appel, del Hospital Metodista de Houston, y Mathew Blurton-Jones, de la Universidad de California en Irvine, descubrieron que los ratones genomanipulados para que carecieran de inmunidad adquirida presentaban esclerosis lateral amiotrófica y alzhéimer con mayor rapidez y gravedad que los normales. Al restaurar la inmunidad adquirida, la progresión de esas enfermedades se enlentece. Ello indica que sus células ayudan a las neuronas, y no solo las dañan, como se suponía.

A primera vista, la intervención inmunitaria para proteger al SNC dañado parece ilógica. Cuando este sufre un traumatismo, el sistema inmunitario desencadena una respuesta inflamatoria en que se liberan sustancias tóxicas para aniquilar los patógenos y, en algunos casos, deshacerse de las células dañadas, con lo que restaura el equilibrio. La respuesta inflamatoria es un arma contundente, que para acabar con los enemigos se lleva por delante a algunos amigos. En otros tejidos, esas bajas propias son tolerables en virtud de la fácil regeneración. En cambio, el daño causado en el tejido nervioso central por esa respuesta acostumbra a ser permanente a causa de su escasa capacidad de regeneración. Ante los estragos que puede provocar, los beneficios no suelen compensar el coste de la intervención en el cerebro. Pero tal vez la respuesta inmunitaria observada tras una lesión del SNC solo sea una exacerbación de la que se produce en el encéfalo en condiciones normales.

Estudios recientes apoyan esa idea. En mi colaboración con Hagit Cohen, de la Universidad Ben-Gurión del Néguev, y con Schwartz, descubrimos que los ratones expuestos a estímulos estresantes, como el olor de sus depredadores naturales, despliegan de inmediato una respuesta al estrés, que en nuestro experimento adopta la forma de ocultarse en un laberinto, en lugar de explorarlo. En el 90 por ciento de los casos, la respuesta desaparece en el plazo de horas o días. Pero en el 10 por ciento restante, persiste días o semanas. Los ratones de este segundo grupo sirven como modelo animal del trastorno por estrés postraumático (TEPT). Pues bien, la incidencia del TEPT es varias veces mayor en los ratones que carecen de inmunidad adquirida que en los provistos de un sistema inmunitario normal. Estos resultados mostraron por primera vez que el sistema inmunitario asiste al cerebro no solo ante las infecciones y las lesiones, sino también ante el estrés psicológico. Además, hay indicios que vinculan el sistema inmunitario con el TEPT en el ser humano.

Sin ser tan angustiosas como la exposición al depredador, las tareas que requieren aprendizaje también son estresantes. Pongamos por caso, preparar un examen o incluso cocinar una receta nueva. ¿Podría la incapacidad de soportar el estrés dificultar el proceso de aprendizaje? Para poner a prueba esa hipótesis, junto con mis colaboradores comparamos el rendimiento de ratones carentes de inmunidad adquirida con el de un grupo de control en diversas pruebas de comportamiento. Averiguamos que los primeros, a diferencia de los controles, ejercieron mal las tareas que precisaban aprendizaje espacial y memoria, como localizar una plataforma oculta en un gran depósito de agua. Más tarde demostramos que, además de la alteración del comportamiento de aprendizaje espacial, tales ratones muestran una actitud social anómala: prefieren pasar el tiempo con objetos inanimados que en compañía de sus semejantes.

A la par que aumentan las pruebas de la importante implicación del sistema inmunitario en diversas funciones cerebrales, surgen nue-



TEJIDO MENÍNGEO teñido en el que destacan linfocitos T (*rojo*), macrófagos (*verde*) y un vaso linfático (*amarillo*).

ANTOINE LOUVEAU, FACULTAD DE MEDICINA DE LA UNIVERSIDAD DE VIRGINIA

vos interrogantes. Por ejemplo, ¿cómo ejerce su influencia el sistema inmunitario en el SNC? Al fin y al cabo, el parénquima sano no acoge más células inmunitarias que la microglía. Las citocinas, proteínas segregadas por dichas células y que influyen en el comportamiento de otras, nos ofrecen pistas. Las liberadas por las células inmunitarias periféricas afectan al cerebro. Cabe suponer que llegan a él a través de puntos donde la barrera hematoencefálica ha perdido su integridad y podrían ejercer un efecto directo por medio del nervio vago, que se extiende desde el encéfalo hasta el abdomen. Los datos recabados hacen pensar que las citocinas que afectan a la actividad cerebral proceden de las células inmunitarias radicadas en las meninges (las membranas que envuelven el encéfalo y la médula espinal). Averiguar cómo entran esas células en las meninges, cómo circulan por ellas y cómo sintetizan sus citocinas es en este momento objeto de amplias investigaciones.

A este respecto, mis colaboradores y yo hicimos hace poco un interesante descubrimiento sobre el modo de eliminación de las toxinas y los desechos por el organismo. Los tejidos contienen dos clases de vasos. A semejanza de las tuberías de un edificio, destinadas unas al suministro de agua potable y otras a la evacuación de las aguas residuales, los tejidos cuentan con vasos sanguíneos que aportan oxígeno y nutrientes, y con vasos linfáticos que eliminan las toxinas y otros desechos generados. Estos últimos también transportan antígenos (sustancias capaces de generar una respuesta inmunitaria) hasta los ganglios linfáticos de drenaje, donde las células inmunitarias los inspeccionan para recabar información sobre el tejido del que proceden. Si detectan un problema, como lesiones o infecciones, las células se activan y migran al tejido afectado para intentar resolverlo.

Por la arraigada creencia de que el cerebro sano no se relaciona con el sistema inmunitario, sumada a la ausencia de vasos linfáticos en el parénquima, se daba por sentado que el cerebro y el resto del SNC no se servían de la circulación linfática. Ahora bien, esta suposición planteaba un interrogante: ¿por qué el cerebro no alerta al sistema inmunitario de posibles daños que este podría ayudarle a resolver? ¿Y cómo se las arregla el sistema inmunitario para detectar las infecciones encefálicas? Es más, los estudios han revelado que las lesiones cerebrales desatan una intensa respuesta inmunitaria en ganglios linfáticos situados fuera del SNC. ¿Cómo es posible?

Fascinados por la actividad inmunitaria de las meninges y sus efectos sobre el funcionamiento encefálico, junto con mis colaboradores y yo decidimos examinarlas con detenimiento. Ello nos llevó a descubrir, de modo fortuito, que alojaban vasos linfáticos. Otros grupos de investigación han hecho hallazgos similares en peces, ratones, ratas, primates y humanos. Los resultados confirman el vínculo entre el cerebro y el sistema linfático, propuesto hace unos 200 años pero prácticamente descartado. Estos vasos constituyen una verdadera red linfática que drena el SNC, el eslabón perdido que transmite información sobre las infecciones y las lesiones encefálicas al sistema inmunitario.

La existencia de conductos linfáticos y células inmunitarias en las meninges obliga a replantear la función exacta de tales membranas. La explicación ortodoxa es que solo transportan líquido cefalorraquídeo, encargado de proteger al encéfalo mediante amortiguamiento hidráulico. Pero, a juzgar por la alta densidad celular del tejido cerebral y la gran sensibilidad de las neuronas durante la transmisión de las señales, desplazar la actividad inmunitaria a los márgenes meníngeos quizá fue la solución evolutiva al problema de que el sistema inmunitario tenga que atender a todo el SNC sin alterar el funcionamiento neuronal.

El descubrimiento de la red linfática del encéfalo desveló cómo recibe el sistema inmunitario información sobre el daño tisular en el SNC. Pero para ver cómo se comunican en realidad las células inmunitarias meníngeas con el parénquima e influyen en él a distancia, hay que observar otra red del sistema cerebral de eliminación de residuos. Además de la circulación linfática descubierta, el parénquima del SNC es bañado por una red de canales que albergan líquido cefalorraquídeo. Maiken Nedergaard, de la Universidad de Rochester, la ha denominado «sistema glinfático». Desde las meninges, el líquido penetra en el parénquima a través de los espacios que circundan las arterias del cerebro, baña los tejidos y confluye en los espacios que rodean las venas, para retornar a su depósito en las meninges. Cabe suponer que esa corriente de líquido transporte moléculas inmunitarias, como las citocinas, desde las meninges hasta el parénquima, donde ejercen su influencia.

Los estudios sobre citocinas han esclarecido cómo modulan el comportamiento. Por citar un caso, Robert Dantzer, actualmente en el Centro Oncológico MD Anderson de la Universidad

de Texas, y Keith Kelley, de la Universidad de Illinois, en Urbana-Champaign, han determinado que la interleucina 1β inicia la conducta de enfermedad, nombre que recibe la constelación de conductas habituales de las personas enfermas, como dormir mucho, comer menos y rehuir el contacto social. Y mi propio equipo ha demostrado recientemente que el interferón γ, citocina producida por los linfocitos T meníngeos, interactúa con las neuronas de la corteza prefrontal que, entre otras funciones, interviene en la conducta social. Descubrimos con sorpresa que esta citocina no ejerce su influencia por medio de las células inmunitarias residentes (la microglía cerebral), sino a través de las neuronas que controlan los circuitos relacionados con la conducta social. De hecho, las citocinas son esenciales para el correcto funcionamiento de esos circuitos: sin linfocitos T o sin su interferón γ, las neuronas no logran regularlos bien y se vuelven hiperactivos, como sucede en casos de deficiencias sociales. En suma, una citocina producida por las células inmunitarias de las meninges es capaz de modificar la actividad neuronal, de alterar así la circuitería y, a la postre, de cambiar la conducta.

El interferón γ no es la única molécula inmunitaria que influye en el cerebro. Mario de Bono, del Laboratorio de Biología Molecular MRC de Inglaterra, y sus colaboradores han descubierto que otra citocina, la IL-17, activa neuronas sensitivas del nematodo *Caenorhabditis elegans* y modifica su comportamiento ante la detección de oxígeno. Además, un trabajo reciente de Gloria Choi, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y sus colaboradores ha demostrado que la IL-17 puede interactuar con neuronas de la corteza cerebral y alterar conductas relacionadas con el trastorno del espectro autista.

¿OTRO ÓRGANO DE LOS SENTIDOS?

Cabría preguntarse por qué un órgano tan poderoso como el cerebro precisa del control o del apoyo del sistema inmunitario. He elaborado una hipótesis que pretende explicar por qué ambos mantienen tan estrecho vínculo. Como sabemos, los cinco sentidos son el olfato, el tacto, el gusto, la vista y el oído. Se suele llamar sexto sentido a la propiocepción, esto es, a la percepción de la posición y del movimiento del cuerpo. Todos ellos informan al cerebro del entorno exterior y del medio interno, lo que le permite decidir las acciones precisas para sobrevivir. La facultad de percibir los microorganismos, tan abundantes en ambos medios, y responder a sus agresiones es capital para la supervivencia. Precisamente esa cualidad distingue al sistema inmunitario, con la capacidad de la inmunidad innata para reconocer invasores en general y el talento de la inmunidad adquirida para reconocerlos de forma específica. Según mi propuesta, su función definitoria es la capacidad de detectar los microorganismos e informar sobre ellos al cerebro. Si, como sospecho, la respuesta inmunitaria está integrada en el cerebro, constituiría un séptimo sentido.

Es posible poner a prueba esta hipótesis. Puesto que todos los circuitos encefálicos están conectados, la interferencia en uno de ellos suele afectar también a otros. Por ejemplo, la comida sabe distinta con el olfato alterado. La demostración de que entorpecer la afluencia de las señales inmunitarias altera otros circuitos apoyaría la idea de que la respuesta inmunitaria es un séptimo sentido innato. La conducta de enfermedad brinda otro posible ejemplo. Tal vez la llegada masiva de señales del séptimo sentido para dar cuenta al cerebro de una infección desborde el sistema y altere los circuitos que modulan la somnolencia, el apetito y demás, lo que originaría los cambios de conducta característicos de la persona enferma. Por otro lado, la información sobre los microorganismos que el sistema sensorial inmunitario transmite al cerebro induciría a este a desencadenar la conducta de enfermedad como mecanismo de protección, pues reduce la exposición a otros patógenos y economiza energía.

Los conocimientos acerca de la relación entre el sistema nervioso central y el inmunitario todavía se encuentran en sus inicios. No debería sorprendernos si los nuevos descubrimientos en este campo durante los próximos 10 o 20 años nos brindasen una perspectiva completamente distinta de ambos. Con todo, espero que el saber fundamental que hoy poseemos se enriquezca con las conclusiones de estos estudios, sin suscitar cambios radicales. Será prioritario cartografiar las conexiones entre los componentes inmunitarios y los circuitos neurales, con sus interacciones e interdependencia en situaciones de salud y enfermedad. Conocer esas relaciones permitirá a los investigadores poner el foco en la transmisión de las señales inmunitarias para el tratamiento de los trastornos neurológicos y mentales. El sistema inmunitario es una diana farmacológica más accesible que el SNC, por lo que resulta verosímil que su reparación mediante terapia génica, o hasta su reemplazo gracias a un trasplante de médula ósea, sean algún día medios viables para tratar los trastornos cerebrales. A la vista de las innumerables alteraciones inmunitarias que concurren en dichos trastornos, es probable que la investigación de las interacciones neuroinmunitarias se prolongue durante las próximas décadas para revelarnos poco a poco los profundos misterios del cerebro. IyC

Si la respuesta inmunitaria estuviese integrada en el cerebro, constituiría un séptimo sentido

PARA SABER MÁS

Structural and functional features of central nervous system lymphatic vessels. Antoine Louveau et al. en *Nature*, vol. 523, páginas 337–341; 16 de julio de 2015.

Multifaceted interactions between adaptive immunity and the central nervous system. Jonathan Kipnis en *Science*, vol. 353, páginas 766–771; 19 de agosto de 2016.

Immune system: The "seventh sense". Jonathan Kipnis en *Journal of Experimental Medicine*, vol. 215, n.º 2, páginas 397–398; febrero de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

El sistema inmunitario del cerebro. Wolfgang J. Streit y C. A. Kincaid-Colton en *IyC*, enero de 1996.

Drenaje cerebral. Maiken Nedergaard y Steven A. Goldman en *IyC*, mayo de 2016.



ASTROFÍSICA

¿ES REAL LA MATERIA OSCURA?

En los últimos años se han acumulado varias observaciones difíciles de compatibilizar con la hipótesis de la materia oscura. Es hora de preguntarse si la gravedad podría ser más compleja de lo que nos enseñó Einstein

Sabine Hossenfelder y Stacy S. McGaugh

MONDOLITHIC STUDIOS



Sabine Hossenfelder es física teórica del Instituto de Estudios Avanzados de Fráncfort, donde investiga en gravedad cuántica y física más allá del modelo estándar. Es autora del blog *Backreaction* y del libro *Lost in math: How beauty leads physics astray* (Basic Books, 2018).



Stacy S. McGaugh es astrofísico de la Universidad Case Western Reserve. Es experto en galaxias de bajo brillo superficial, las cuales permiten poner a prueba las teorías de gravedad modificada y de materia oscura.



as estrellas aún guardan secretos. Hoy sabemos por qué brillan y por qué titilan, pero seguimos ignorando por qué se mueven de la forma en que lo hacen. Este problema nos ha acompañado durante la mayor parte de los últimos cien años. En la década de 1930, el astrónomo suizo Fritz Zwicky observó que algunas galaxias de un cúmulo formado por unas mil giraban sorprendentemente rápido alrededor de su centro de masas común. La masa de las galaxias del cúmulo no sumaba lo suficiente para explicar dicho movimiento, ni aun siendo generoso en los cálculos. Para resolver el desajuste, Zwicky postuló la existencia de un nuevo tipo de materia: la «materia oscura».

En los años setenta, la estadounidense Vera Rubin, fallecida en 2016, observó que algo parecido ocurría en el interior de las galaxias. La velocidad de las estrellas más alejadas del centro era aproximadamente igual a la de las estrellas interiores, cuando en realidad tendrían que moverse más despacio debido a la menor intensidad de la gravedad en los confines de la galaxia. Una vez más, la masa visible no bastaba para explicar las observaciones, por lo que Rubin concluyó que también las galaxias individuales debían hallarse impregnadas de materia oscura.

Desde entonces, los indicios de que hay algo que debemos estar pasando por alto se han ido acumulando. Las diminutas fluctuaciones de temperatura que motean el fondo cósmico de microondas; la manera en que se desvían los rayos de luz alrededor de las galaxias y los cúmulos de galaxias, y la formación de la red de estructuras cósmicas a gran escala confirman que, por sí sola, la materia normal no basta para explicar lo que vemos.

Durante decenios, la hipótesis más popular ha sido que la materia oscura se compone de partículas elementales hasta hoy desconocidas que no interaccionan con la luz. La explicación alternativa, según la cual lo que falla no es nuestro conocimiento de las partículas, sino nuestras leyes de la gravedad, nunca ha recibido demasiada atención.

Hace treinta años esa postura estaba justificada, ya que los físicos contaban con otras razones para creer en la existencia de nuevas partículas. En los años cincuenta y sesenta se comprobó que los protones, los neutrones y los electrones no eran las únicas partículas que existían, y en los decenios siguientes los aceleradores descubrieron todo un abanico de partículas nuevas. Estas acabarían constituyendo lo que hoy denominamos «modelo estándar» e hicieron que los teóricos se abrieran a nuevas posibilidades. Por ejemplo, los intentos de unificar las interacciones fundamentales exigían postular la existencia de nuevas partículas. Y la noción de supersimetría, desarrollada en los años setenta, implicaba que, por cada variedad de partícula conocida, tendría que haber otra aún por descubrir. Es más, algunas de aquellas hipotéticas partículas supersimétricas eran muy buenas candidatas para dar cuenta de la materia oscura. Otro sospechoso era el axión: una partícula postulada para explicar el pequeño valor de cierto parámetro del modelo estándar [*véase* «Materia oscura axiónica», por Leslie Rosenberg; Investigación y Ciencia, marzo de 2018]. Pero, después de tres décadas de intentos fallidos en la detección de estas partículas, seguir ignorando las alternativas ha dejado de ser una postura razonable.

Al mismo tiempo, la idea de una materia oscura formada por partículas se ha visto cuestionada por razones completamente distintas: varios datos astrofísicos obtenidos por uno de nosotros (McGaugh) y otros investigadores no concuerdan con las

EN SÍNTESIS

A fin de explicar los movimientos de las estrellas y las galaxias, hace decenios que los científicos suponen que el universo se encuentra repleto de partículas de materia oscura.

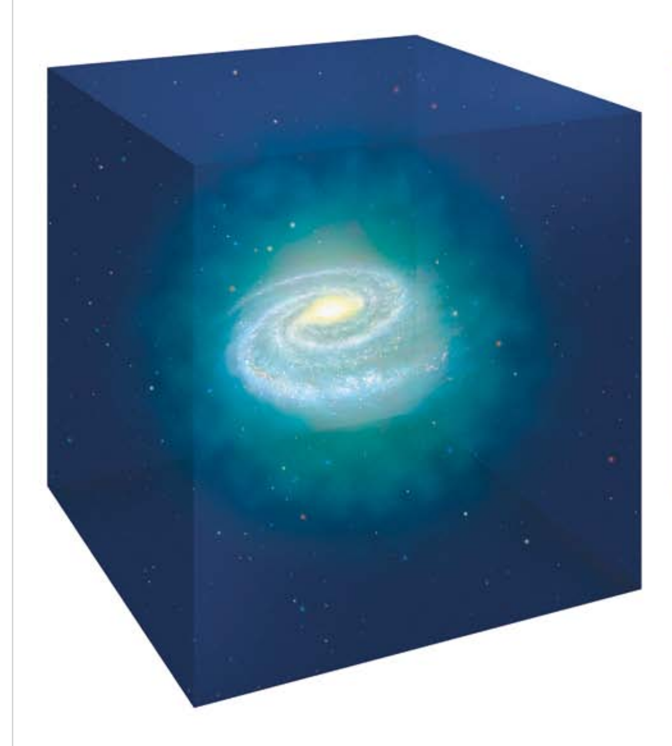
Una hipótesis alternativa postula que la materia oscura no existe. En su lugar, los mismos fenómenos podrían explicarse modificando las ecuaciones que describen la gravedad.

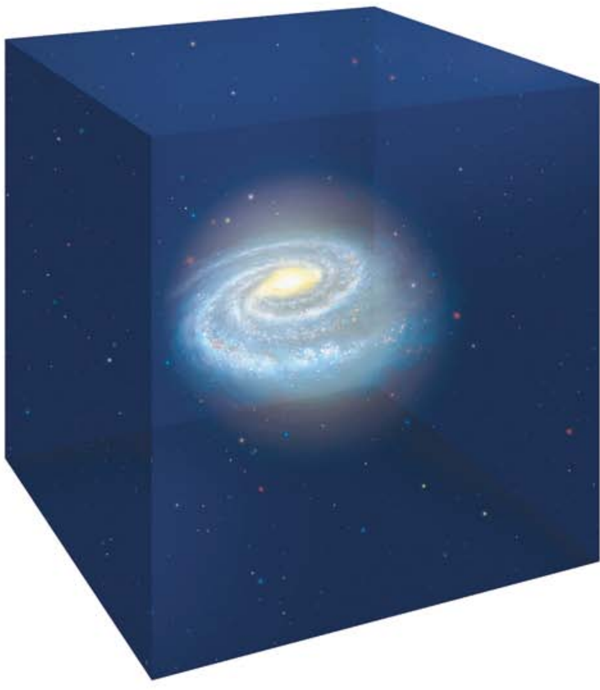
Las teorías de gravedad modificada han recibido mucha menos atención que las de materia oscura. Sin embargo, todos los intentos de detectar sus supuestas partículas han fracasado.

Varias observaciones han puesto en nuevos aprietos a la hipótesis de la materia oscura. Es hora de que los físicos se liberen de sus prejuicios y reconsideren las teorías de gravedad modificada.

Materia oscura y gravedad modificada

Hace décadas que los astrónomos se percataron de que en el universo parece faltar masa. Para explicar el movimiento de las estrellas en las galaxias y el de estas en los cúmulos galácticos, los teóricos propusieron que el cosmos debía estar impregnado de «materia oscura», compuesta por partículas invisibles. Hasta ahora, sin embargo, ningún experimento ha sido capaz de detectarlas. La idea alternativa, según la cual sería necesario modificar las leyes de la gravedad, merece un examen más detallado.





Con partículas invisibles

La hipótesis de la materia oscura postula que las galaxias se hallarían inmersas en gigantescos «halos» de partículas invisibles (*verde*) cuya masa superaría holgadamente a la de la materia que podemos ver. En el caso de las galaxias, por ejemplo, esa masa adicional explicaría por qué las estrellas más alejadas del centro orbitan casi tan rápido como las del interior.

Sin partículas invisibles

Sin embargo, el movimiento de las estrellas en las galaxias o el de estas en los cúmulos podría también explicarse postulando cambios en las leyes de la gravedad. Las teorías de gravedad modificada alteran las ecuaciones de la relatividad general de Einstein a fin de dar cuenta de las observaciones sin recurrir a la materia oscura. Según ellas, la materia que vemos es todo lo que existe.

LYNETTE COOK

predicciones de dicha hipótesis. Cada vez parece más claro que algunos viejos problemas asociados al paradigma tradicional de la materia oscura siguen sin poder resolverse.

Modificar las leyes de la gravedad sigue siendo una opción viable. En lugar de añadir partículas al universo para explicar la gravedad extra que parece existir en las galaxias y los cúmulos de galaxias, podemos ceñirnos a las partículas conocidas y aumentar la atracción gravitatoria que ejercen unas sobre otras. A menudo subestimadas, estas teorías de «gravedad modificada» nunca han sido descartadas por completo. Ahora ha llegado el momento de considerar que tal vez hayamos estado buscando algo equivocado en el lugar equivocado.

AJUSTAR LA GRAVEDAD

La gravedad modificada, propuesta por primera vez por el físico israelí Mordehai Milgrom en 1983, cambia las reglas matemáticas que establecen la relación entre la fuerza gravitatoria y la masa. En las situaciones más habituales, sabemos que dicha fuerza sigue la ley del cuadrado inverso: la atracción entre dos objetos resulta proporcional a sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa. Esta ley aparece en múltiples ámbitos de la física, desde las ecuaciones que describen cómo disminuye la intensidad de la luz con la distancia hasta las que hacen referencia al sonido. Pero ¿y si la gravedad no siguiera siempre la ley del cuadrado inverso? ¿Qué ocurriría si en determinadas circunstancias las verdaderas ecuaciones fueran otras?

La primera propuesta de Milgrom, la «dinámica newtoniana modificada» (MOND, por sus siglas en inglés), solo se ocupaba de las leyes de la gravedad de Newton. Pero la teoría de la relatividad general de Einstein nos enseñó que la gravedad no es una fuerza, sino que tiene su origen en la curvatura del espacio y el tiempo. Probablemente, esta limitación de la teoría MOND original fue una de las razones principales por las que muchos no se la tomaron en serio. Pero hoy conocemos varias formas de compatibilizar MOND con la relatividad general, las cuales recurren a campos de distintos tipos para describir cómo surge la atracción gravitatoria a partir de la masa. Es a este tipo de teorías (unas diez, aproximadamente) a las que nos referimos cuando hablamos de gravedad modificada. Desestimarlas por

razones puramente teóricas ya no está justificado. Otra objeción es que su formulación matemática no es elegante desde la perspectiva de la física de partículas. La gravedad modificada no solo resulta poco familiar, sino que también es más difícil de manejar que la hipótesis de la materia oscura, la cual se basa en técnicas familiares para un físico. Sin embargo, aunque estas circunstancias ayuden a explicar la impopularidad de la idea, no constituyen razones científicas para desestimarla.

A pesar del potencial que presentan las teorías de gravedad modificada, los físicos han dedicado casi toda su energía a la búsqueda de la materia oscura. Desde mediados de los años ochenta, decenas de proyectos han intentado sin éxito detectar las raras ocasiones en las que se supone que las partículas de materia oscura deberían interaccionar con la materia ordinaria. Dichos experimentos emplean grandes tanques de gases nobles licuados o sólidos, minuciosamente preparados a temperaturas ultrabajas y situados en entornos bien protegidos, como minas subterráneas, para blindarlos de las interacciones con la radiación cósmica. Sus sensibles detectores esperan con paciencia las señales que produciría una partícula de materia oscura al rebotar contra uno de los núcleos atómicos del material.

Varios experimentos de este tipo acaban de concluir. Los detectores ultrasensibles LUX, en Dakota del Sur, y PandaX-II, en la provincia china de Sichuán, anunciaron hace poco que no habían encontrado rastro de partículas de materia oscura. Los primeros resultados de XENON1T (una versión renovada del experimento XENON100, que a su vez era una mejora de XENON10), en el Laboratorio Nacional del Gran Sasso, en Italia, también han sido negativos. Super-Kamiokande, en Japón, tampoco ha detectado ninguna señal de la desintegración del protón, un proceso predicho por algunas teorías de unificación de las interacciones fundamentales y que otorgaría credibilidad a la idea de que deben existir partículas que no vemos. Al mismo tiempo, los científicos del Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN han estado buscando nuevas partículas (aparte del esperado bosón de Higgs) y no han visto signos de ellas.

Cada vez parece más claro que algunos problemas asociados al paradigma de la materia oscura siguen sin poder resolverse

Por supuesto, estos resultados negativos no descartan la existencia de la materia oscura, pero han hecho que las teorías que intentan describirla se vuelvan cada vez más complejas, por no decir artificiosas. Para evitar el conflicto con los resultados nulos de los experimentos, hay que postular que las partículas de materia oscura interaccionan con la materia normal aún menos de lo que se pensaba en un principio. Algunos investigadores han comenzado a postular nuevas interacciones de la naturaleza y todavía más especies de partículas [*véase* «Materia oscura compleja», por Bogdan A. Dobrescu y Don Lincoln; Investigación y Ciencia, septiembre de 2015]. Esta proliferación de partículas invisibles ha llegado a ser tan común en la bibliografía que incluso se ha acuñado un término colectivo para referirse a ellas: «sector oculto».

COMPARAR TEORÍAS

A falta de signos de nuevas partículas, deberíamos preguntarnos cuán bien explican las teorías de la materia oscura y de gravedad modificada los datos que nos ofrece la naturaleza.

En general, la hipótesis de que el universo contiene aproximadamente cinco veces más materia oscura que materia normal explica bien el cosmos. Aunque las propiedades microscópicas de la materia oscura puedan ser complicadas, macroscópicamente obedece ecuaciones simples. Podemos describir el comportamiento de la materia oscura como el de un fluido sin presión interna, cuya única variable relevante es la densidad media de partículas en el espacio.

Tratar la materia oscura como un fluido sin presión basta para reproducir los rasgos observados en el fondo cósmico de microondas y permite también explicar la formación de estructuras cósmicas a gran escala. A medida que el universo primitivo se expandía y la materia se enfriaba, la materia oscura, debido a que no ejerce presión interna, habría comenzado a agruparse bajo la atracción de la gravedad antes que la materia normal. Solo más tarde, la materia normal comenzó a acumularse en el interior de las nubes de materia oscura para formar galaxias. Esta imagen encaja bien con algunos aspectos de nuestras observaciones.

La materia oscura explica el movimiento de las estrellas en el seno de las galaxias siempre que supongamos que está distribuida en la cantidad adecuada allí donde la necesitamos. En los cúmulos de galaxias funciona de manera muy similar. El hecho de que sea posible «esparcir» la materia oscura de manera tan flexible permite que todas las observaciones concuerden con las predicciones de la relatividad general.

Pero esa flexibilidad de la materia oscura es también su mayor defecto. Las galaxias no son partículas, y no hay dos iguales. Cada una tiene su propia historia, debida a la particular y delicada danza de los miles de millones de estrellas que se agruparon por efecto de la atracción gravitatoria. Algunas galaxias jóvenes colisionan y engendran otras mayores; otras no lo hacen. Algunas se convierten en discos en rotación, otras en hinchadas elipses. En ocasiones, las nubes de materia oscura atraen grandes cantidades de materia ordinaria; otras veces no. Debido a todas estas variaciones, cabría esperar que la relación entre materia oscura y materia normal cambiase de una galaxia a otra. Observaríamos una variedad mayor, no reglas estrictas. Sin embargo, los datos muestran otra cosa.

En 2016, McGaugh y sus colaboradores efectuaron miles de mediciones en más de 150 galaxias y compararon la atracción gravitatoria que debería generar la materia normal con la atracción gravitatoria observada, supuestamente causada por la combinación de la materia oscura y la ordinaria. Lo que hallaron fue sorprendente: una fuerte correlación entre ambas. De hecho, una ecuación sencilla relaciona la cantidad aparente de materia oscura con la cantidad de materia normal presente en cada galaxia; las desviaciones al respecto son pocas y reducidas.

Dicha correlación es difícil de reproducir mediante las simulaciones por ordenador que tratan ambos tipos de materia como componentes independientes. Es posible hacer que las simulaciones se ajusten a los datos, pero para ello hay que introducir una gran cantidad de parámetros que deben ajustarse cuidadosamente. En marcado contraste, la gravedad modifi-

cada simplemente predice esta correlación. Debido a que en este escenario solo hay un tipo de materia (la materia ordinaria), la atracción gravitatoria se halla estrechamente relacionada con la materia visible. No en vano, Milgrom llegó a predecir esta observación en los años ochenta.

GALAXIAS POCO COMUNES

La hipótesis tradicional de la materia oscura presenta otros problemas; entre ellos, los datos relativos a las llamadas «galaxias de bajo brillo superficial». En estas galaxias tenues, la materia visible se halla más dispersa que en las galaxias similares a la Vía Láctea.

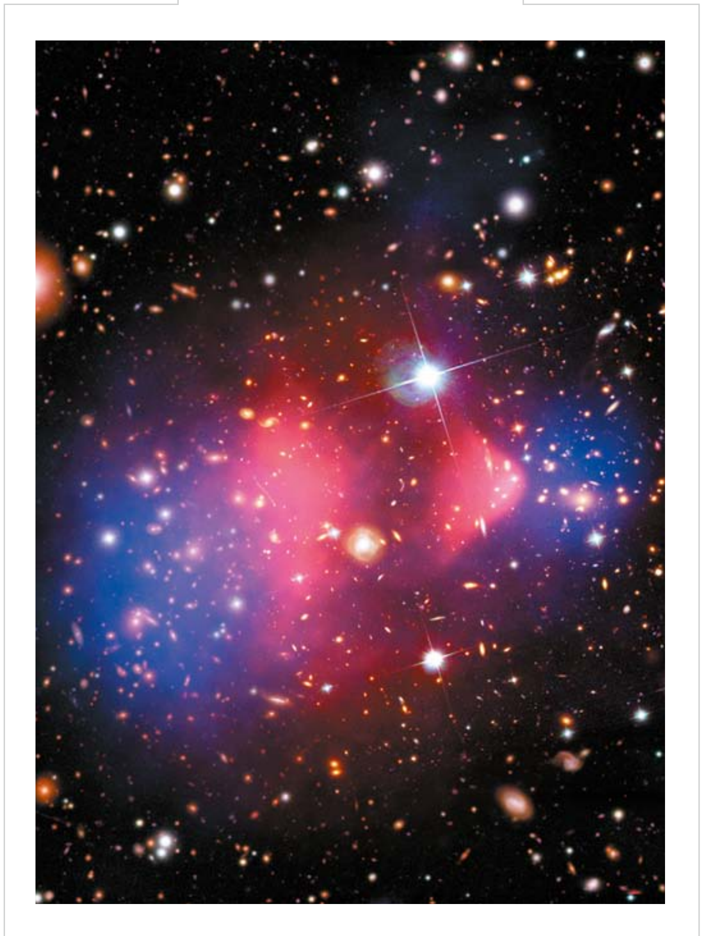
En un principio, la hipótesis de la materia oscura llevó a suponer que las galaxias de bajo brillo superficial —es decir, con pequeñas cantidades de materia visible— también deberían tener poca materia oscura. Como consecuencia, las estrellas situadas a grandes distancias del centro galáctico deberían moverse más despacio que en las galaxias normales del mismo tamaño, ya que la atracción gravitatoria total que experimentarían dichas estrellas sería menor. No obstante, cuando llegaron los datos, tal expectativa se demostró incorrecta: las estrellas exteriores de estas galaxias poco frecuentes se movían tan rápido como las de las galaxias normales. Ello parecía indicar que las galaxias de bajo brillo superficial, a pesar de su escasez de estrellas, contenían grandes cantidades de materia oscura. En ellas, la proporción entre materia oscura y materia ordinaria debía ser mucho más elevada de lo que se supuso en un principio. Pero ¿por qué tendría que ser así?

La hipótesis de la materia oscura no ofrecía ninguna explicación. Pero, como ya hemos adelantado, se trata de una hipótesis muy flexible. De modo que, cuando los teóricos buscaron formas de explicar ese extraño fenómeno, las encontraron.

Para que los resultados cuadrasen con la teoría, fue necesario postular una relación mucho más refinada entre la cantidad de materia oscura y de materia ordinaria, a fin de que la primera dependiese del brillo superficial generado por las estrellas: cuanto más tenue fuese un sistema, más materia oscura debía contener. Ello requería introducir algún mecanismo para que estas galaxias se deshicieran de la materia luminosa mientras se formaban, a fin de que la proporción entre ambos tipos de materia se inclinase hacia el lado de la materia oscura. En la actualidad, el método más popular para lograrlo consiste en añadir un mecanismo conocido como «retroalimentación estelar» en las simulaciones por ordenador. Este fenómeno hace referencia a la presión creada cuando las estrellas más masivas irradian con fotones muy energéticos el gas que las rodea, emiten fuertes vientos estelares y estallan finalmente en forma de supernova. Estas tremendas explosiones pueden expulsar materia de las galaxias. Y, debido a que la materia oscura interacciona tan débilmente, dicho proceso de expulsión afectaría en mayor medida a la materia normal que a la oscura. Así, las galaxias con abundancia de supernovas terminarían con una proporción mayor de materia oscura.

NASA/CXC/CFA/M. MARKEVITCH ET AL. *(rayos X)*; NASA/STSCI Y MAGALLANES/UNIVERSIDAD DE ARIZONA/D. CLOWE ET AL. *(luz visible)*; NASA/STSCI, WFI/ESO Y MAGALLANES/UNIVERSIDAD DE ARIZONA/D. CLOWE ET AL. *(mapa de lentes gravitacionales)*

CÚMULOS DE GALAXIAS



Una colisión ofrece pistas

El cúmulo de Bala (*imagen*) consta de un par de cúmulos de galaxias que colisionaron hace largo tiempo: un ejemplo inusual de una colisión frontal a toda velocidad. Las imágenes tomadas en luz visible y rayos X (*rojo*), junto con las mediciones de cómo se desvía la luz debido a la gravedad (efecto de lente gravitacional, *azul*), revelan que, en cada cúmulo, el centro de masas y de gravedad de la masa total no coincide con el de la materia visible.

Muy a menudo se afirma que el cúmulo de Bala demuestra la existencia de la materia oscura. Debido a que las partículas que la componen interaccionarían menos que las de materia ordinaria, la colisión habría provocado que las nubes de materia oscura asociadas a los cúmulos se atravesaran. La materia visible, en cambio, habría interaccionado consigo misma, por lo que habría quedado rezagada. Ese relato se ajusta a las observaciones, pero peca de una simplificación excesiva.

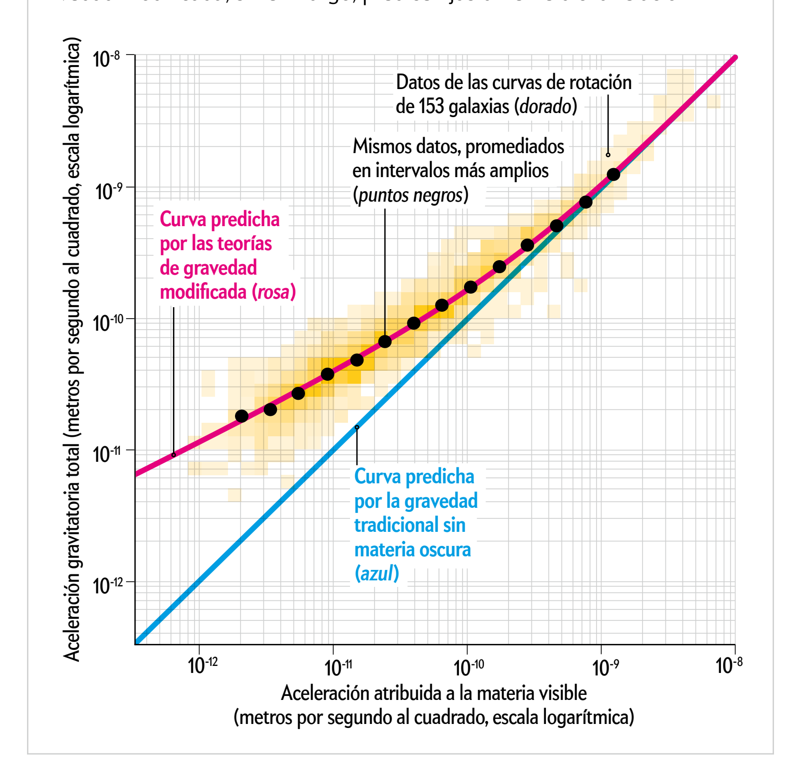
En las teorías de gravedad modificada, el punto donde se concentra la atracción gravitacional también puede estar desplazado con respecto a la masa ordinaria. Ello se debe a que, según creemos, todas las fuerzas, incluida la gravedad, son transmitidas por partículas de cierto tipo, las cuales obedecen sus propias leyes dinámicas. En gravedad modificada, el comportamiento de estas partículas mediadoras puede también explicar las observaciones del cúmulo de Bala.

Más importante aún, este cúmulo constituye un evento extremo y estadísticamente atípico. Su mera existencia resulta difícil de explicar tanto con la materia oscura como con la gravedad modificada. Usarlo como prueba a favor o en contra de cualquiera de las dos propuestas no es sino un ejercicio de confirmación de nuestros prejuicios.

GALAXIAS INDIVIDUALES

Datos problemáticos

Un estudio de 2016 examinó el movimiento de las estrellas en varias galaxias y halló que la gravedad total (*eje y*) se hallaba fuertemente relacionada con la causada por la materia visible (*eje x*). Ello choca con la hipótesis de la materia oscura, ya que el número de partículas invisibles no debería depender solo de la cantidad de materia visible, sino también del tamaño, contenido y forma de cada galaxia. Las teorías de gravedad modificada, sin embargo, predicen justamente dicha relación.



No obstante, aunque sabemos que la retroalimentación estelar desempeña un papel importante en la formación de las estrellas y los cúmulos estelares, su función durante la formación de galaxias no está tan clara. Para resolver el problema de las galaxias de bajo brillo superficial, es necesario suponer que la energía de las supernovas se invierte casi por completo en expulsar la materia visible de las galaxias. Un nivel tan alto de eficiencia, sin embargo, es extraordinariamente improbable en un proceso natural. En cambio, la gravedad modificada predice el resultado observado sin recurrir a la retroalimentación, del mismo modo que predecía las velocidades de rotación observadas para las estrellas de las galaxias normales.

MÁS PROBLEMAS

El problema con las galaxias de bajo brillo superficial no es ni mucho menos el único al que se enfrenta la hipótesis de la materia oscura. Esta predice una densidad de materia con un pico muy pronunciado en el centro de las galaxias, en contraste con lo que medimos. También implica que debería haber muchas más galaxias enanas de las que observamos, y no logra explicar por qué las galaxias satélite y sus galaxias anfitrionas se disponen en un mismo plano. Estos son solo los desacuerdos más importantes. En todos ellos, la gravedad modificada funciona mejor que la hipótesis de la materia oscura.

En particular, la ausencia de picos de densidad en los núcleos galácticos encaja tan mal con la hipótesis de la materia oscura que, cuando los datos al respecto aún eran recientes, muchos dudaron de que fueran correctos. Primero, los teóricos sostuvieron que la resolución de las medidas no era la adecuada. Cuando los datos posteriores corrigieron el problema de la resolución, lo achacaron a otros errores sistemáticos. Pero, tras varias tandas más de observaciones obtenidas por diferentes grupos, la conclusión sigue siendo la misma: la materia oscura no explica bien lo que observamos en el centro de las galaxias.

Es cierto que incorporar en las simulaciones la retroalimentación estelar y otros efectos astrofísicos mitiga estos problemas. Y, dado que tales procesos añaden más parámetros a las simulaciones, los investigadores pueden hacer que estas produzcan galaxias que se asemejan razonablemente a lo que observamos. Estas galaxias simuladas pueden también reproducir la correlación mencionada entre las cantidades de materia oscura y ordinaria. Sin embargo, lo que las simulaciones por ordenador no ofrecen es una explicación para el origen de dicha correlación.

Además, y a diferencia de las simulaciones con materia oscura, la gravedad modificada puede explicar el comportamiento de las galaxias pequeñas que se encuentran atrapadas en el campo gravitatorio de otras de mayor tamaño. Por ejemplo, los cálculos han predicho con enorme éxito la manera en que gira un grupo de galaxias enanas descubiertas recientemente alrededor de Andrómeda, nuestra gran galaxia vecina. Estas diminutas galaxias enanas se hallan sometidas a la atracción gravitatoria de su enorme anfitriona. En esa situación, la gravedad modificada ofrece una predicción distinta de la que proporcionaría si las galaxias enanas estuvieran aisladas, y es esa predicción única la que vemos materializada en las observaciones. En cambio, reproducir este aspecto a partir de la hipótesis de la materia oscura requiere añadir aún más suposiciones a las simulaciones por ordenador.

Pero seamos justos: a pesar de todos sus éxitos predictivos, la gravedad modificada adolece de serios problemas. Aunque funciona para una gran variedad de tipos de galaxias, no logra explicar demasiado bien el movimiento de los cúmulos. Y por cuanto respecta al comportamiento del cosmos en conjunto, la gravedad modificada sigue sin poder decir nada. En estos casos, la hipótesis de la materia oscura funciona mejor. Explica las propiedades del fondo cósmico de microondas y la distribución a gran escala de galaxias en el universo, aspectos para los que la gravedad modificada carece de respuestas. No obstante, descartar la gravedad modificada porque no aborda estas situaciones sería un error. La teoría ha hecho predicciones acertadas. Incluso si no entendemos por qué, ignorarlo no va a ayudarnos.

SALIR DEL ATOLLADERO

En este momento, tanto la hipótesis de una materia oscura formada por partículas como las teorías de gravedad modificada presentan sus ventajas y sus inconvenientes. Algunos desarrollos

FUENTES: FEDERICO LELLI, OBSERVATORIO EUROPEO AUSTRAL; «RADIAL ACCELERATION RELATION IN ROTATIONALLY SUPPORTED GALAXIES», STACY S. MCGAUGH, FEDERICO LELLI Y JAMES M. SCHOMBERT EN *PHYSICAL REVIEW LETTERS*, VOL. 117, ART. 201101, 11 DE NOVIEMBRE DE 2016; JEN CHRISTIANSEN (*gráfico*)

teóricos recientes sugieren que la verdad podría hallarse en el medio: un tipo de materia oscura capaz de «disfrazarse» de gravedad modificada.

En 2015, Justin Khoury, de la Universidad de Pensilvania, y sus colaboradores descubrieron que algunas variedades de materia oscura formada por partículas pueden convertirse en superfluidos (fluidos que fluyen sin resistencia y en los que dominan los efectos cuánticos). Cuando la materia oscura superfluida se acumula en las galaxias, sus propiedades cuánticas pueden generar una fuerza de largo alcance que se asemeja a la gravedad modificada. El propio superfluido ejerce una atracción gravitatoria; pero, de acuerdo con la hipótesis de Khoury, la mayor parte del efecto que ahora asignamos a la materia oscura no se debería a la gravedad, sino a la interacción directa entre el superfluido y la materia ordinaria. Este fenómeno explicaría por qué la fuerza que vemos actuar sobre la materia ordinaria no se deja explicar fácilmente por medio de la gravedad: simplemente, no se trataría de la interacción gravitatoria.

La idea de que la materia oscura conste de un superfluido cuyos efectos remedan los de la gravedad modificada también aclara por qué esta última no predice bien el comportamiento de los cúmulos de galaxias. En la mayoría de los ellos, la gravedad no es lo suficientemente intensa para que las partículas den lugar a un superfluido. En su lugar se comportarían como un fluido ordinario; es decir, como la materia oscura tradicional.

La verdad podría hallarse en el medio: un tipo de materia oscura capaz de «disfrazarse» de gravedad modificada

Además, tal y como uno de nosotros (Hossenfelder) descubrió por accidente, la idea de una materia oscura superfluida casa bien con una línea de investigación iniciada por Erik Verlinde, de la Universidad de Ámsterdam. A partir de ideas basadas en la teoría de cuerdas, Verlinde ha argumentado que la impresión de que el universo contiene más materia de la que podemos ver podría no ser más que una ilusión causada por la reacción del espacio a la presencia de masa. Aunque esta idea parece completamente distinta de la hipótesis del superfluido de Khoury, la ecuación clave es casi la misma en ambos casos.

Esta línea de investigación es muy reciente, y bien podría convertirse en un callejón sin salida. Sin embargo, constituye un buen ejemplo de cómo estudiar con más detenimiento la gravedad modificada puede ayudarnos a superar la fase de estancamiento en que nos encontramos.

Además, pronto deberíamos disponer de nuevos datos que nos ayuden a determinar la verdad. La materia oscura tradicional, la gravedad modificada y la materia oscura superfluida hacen distintas predicciones para las galaxias de bajo brillo superficial, las cuales podrían verificarse en un futuro próximo. El Sondeo de la Energía Oscura (DES, por sus siglas en inglés) está identificando este tipo de galaxias, y el Gran Telescopio para Rastreos Sinópticos (LSST) debería encontrar centenares de ellas cuando entre en funcionamiento el próximo año. Todas estas teorías también difieren en sus implicaciones sobre el universo primitivo y el proceso de formación de las primeras galaxias. Tales galaxias deberían poder verse con el telescopio espacial James Webb, con fecha de lanzamiento prevista para 2020; además, varias observaciones futuras en la banda de radio explorarán épocas aún más tempranas de la «edad oscura» (el período previo a la formación de las primeras estrellas).

La llegada de la astronomía de ondas gravitacionales también está aportando nuevas pistas. El Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Láser (LIGO) detectó hace poco las ondas generadas en la colisión de dos estrellas de neutrones, un fenómeno que fue observado al mismo tiempo por multitud de telescopios en distintas longitudes de onda. Ello demostró, con una precisión excelente, que las ondas gravitacionales viajan a la misma velocidad que la luz. Dicho resultado permitió descartar de un plumazo varias teorías de gravedad modificada, aunque desde luego no todas ellas [*véase* «Las teorías de la gravedad tras la tormenta cósmica», por Miguel Zumalacárregui Pérez; Investigación y Ciencia, junio de 2018].

Hoy por hoy solo unas pocas decenas de científicos estudian la gravedad modificada, frente a los varios miles que se afanan en encontrar las partículas que supuestamente componen la materia oscura. Quizá la gravedad modificada no sea correcta, pero tal vez la comunidad científica no esté haciendo un esfuerzo sincero por averiguarlo. El universo tiene la costumbre de sorprendernos, así que deberíamos estar preparados para aceptar con una mente abierta lo que nos digan los datos. Puede que las estrellas sigan guardando secretos, pero se hallan bajo estrecha vigilancia.

PARA SABER MÁS

Radial acceleration relation in rotationally supported galaxies. Stacy S. McGaugh, Federico Lelli y James M. Schombert en *Physical Review Letters*, vol. 117, n.º 20, art. 201101, noviembre de 2016.

Covariant version of Verlinde's emergent gravity. Sabine Hossenfelder en *Physical Review D*, vol. 95, n.º 12, art. 124018, junio de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

¿Existe realmente la materia oscura? Mordehai Milgrom en *IyC*, octubre de 2002.

Galaxias enanas y materia oscura. Pavel Kroupa y Marcel Pawlowski en *IyC*, marzo de 2011.



UN SURFISTA desciende por una ola descomunal en Nazaré, Portugal.

OLAS
STRUOSAS

OCEANOGRAFÍA

Gracias a las mejoras en las técnicas de pronóstico y de asimilación de datos, comienza a ser posible predecir dónde se producirán las mayores olas del planeta

Chris Dixon

El 7 de noviembre de 2017, Rodrigo Koxa apenas pudo dormir. Este brasileño, un avezado surfista de olas gigantes de 38 años de edad, pasaba la noche en Nazaré, un pueblo del litoral portugués. Fuera, olas descomunales hacían temblar el suelo al romper. No paraba de decirse, acosado por un mal recuerdo: «Tienes que tirar justo hacia abajo por tu ola».

En Nazaré, las grandes olas rompen entre octubre y marzo. Koxa no dejaba de mirar los pronósticos de olas de los servicios meteorológicos europeos, de la Administración Nacional de la Atmósfera y el Océano (NOAA) estadounidense y de Surfline, uno de los principales portales de surf. No cabía duda: a la mañana siguiente saldría al mar.

Algunas de las olas más grandes del planeta habían estado rugiendo allí ante los lugareños durante siglos, pero no merecieron la atención mundial de los surfistas hasta el 1 de noviembre de 2011, cuando una moto acuática remolcó al campeón de surf Garrett McNamara y su tabla sobre una ola descomunal: 23,8 metros de altura, el récord Guinness de entonces.

EN SÍNTESIS

Las olas gigantes, de hasta más de 24 metros de altura, se producen solo en unas pocas costas del mundo. Una de ellas es la de Nazaré, en Portugal.

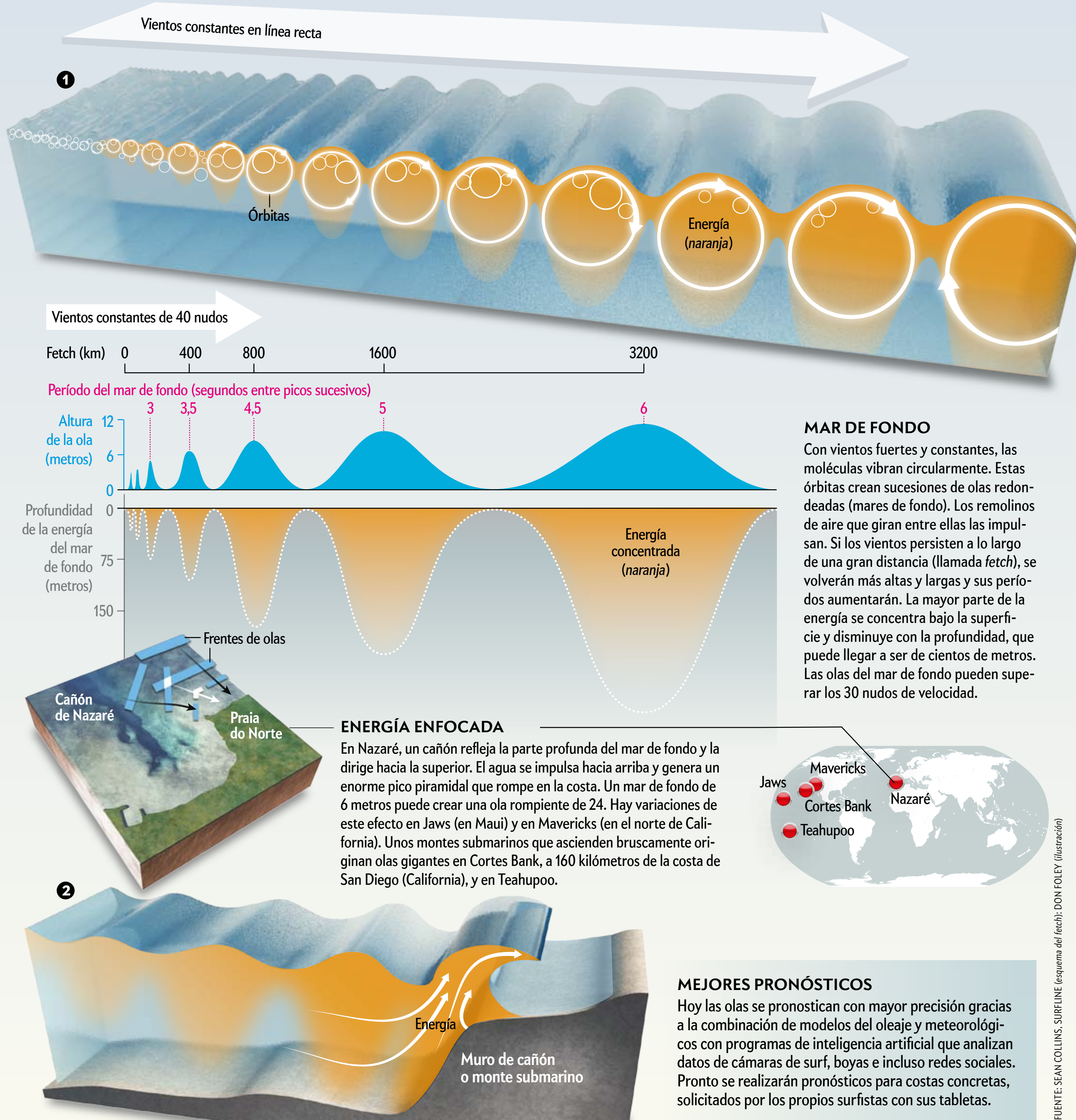
Se han combinado datos hidrológicos y eólicos a tiempo real con modelos del fondo oceánico para explicar por qué se producen esas olas, así como para pronosticar dónde y cuándo romperán las siguientes olas de récord.

Los surfistas de categoría mundial acuden a esos lugares para intentar montar en una de ellas.

FRANCISCO SECO, AP PHOTO

Así se forma una ola gigante

Las olas que llegan a la orilla con entre 21 y 24 metros de altura solo se producen en unos pocos puntos (*mapa*). Empiezan como pequeñas ondulaciones que se organizan en forma cilíndrica. Si soplan vientos constantes a lo largo de miles de kilómetros, las olas de ese mar de fondo irán aumentando de tamaño ❶. Cuando estén cerca de tierra, un cañón profundo o un monte submarino que eleve bruscamente el fondo del mar concentrará su energía, de modo similar a como una lente enfoca la luz. Al ser impulsadas hacia arriba, pueden convertirse en olas descomunales ❷. El cañón de Nazaré, en Portugal, potencia tal efecto.



MAR DE FONDO

Con vientos fuertes y constantes, las moléculas vibran circularmente. Estas órbitas crean sucesiones de olas redondeadas (mares de fondo). Los remolinos de aire que giran entre ellas las impulsan. Si los vientos persisten a lo largo de una gran distancia (llamada *fetch*), se volverán más altas y largas y sus períodos aumentarán. La mayor parte de la energía se concentra bajo la superficie y disminuye con la profundidad, que puede llegar a ser de cientos de metros. Las olas del mar de fondo pueden superar los 30 nudos de velocidad.

ENERGÍA ENFOCADA

En Nazaré, un cañón refleja la parte profunda del mar de fondo y la dirige hacia la superior. El agua se impulsa hacia arriba y genera un enorme pico piramidal que rompe en la costa. Un mar de fondo de 6 metros puede crear una ola rompiente de 24. Hay variaciones de este efecto en Jaws (en Maui) y en Mavericks (en el norte de California). Unos montes submarinos que ascienden bruscamente originan olas gigantes en Cortes Bank, a 160 kilómetros de la costa de San Diego (California), y en Teahupoo.

MEJORES PRONÓSTICOS

Hoy las olas se pronostican con mayor precisión gracias a la combinación de modelos del oleaje y meteorológicos con programas de inteligencia artificial que analizan datos de cámaras de surf, boyas e incluso redes sociales. Pronto se realizarán pronósticos para costas concretas, solicitados por los propios surfistas con sus tabletas.

FUENTE: SEAN COLLINS, SURFLINE (*esquema del fetch*); DON FOLEY (*ilustración*)

Koxa realizó su primer intento en Nazaré en 2014 y, nada más comenzar su descenso por una montaña de agua, estuvo a punto de estrellarse contra los acantilados. Tres años después, con la mirada clavada en los pronósticos, sabía que al día siguiente se enfrentaría a un nuevo coloso.

DATOS PROFUNDOS

Todas las olas que rompen se generan de un modo similar: la brisa transforma las pequeñas ondulaciones en olas. Si el viento sopla con fuerza y en línea recta a lo largo de muchos kilómetros, las olas aumentarán y adoptarán la forma de columnas horizontales de agua, como una serie de troncos casi sumergidos que rodasen hacia la costa. Así, si una ola se eleva tres metros por encima de la superficie, el resto de la masa de agua penetrará hasta muchas decenas de metros de profundidad.

Las olas gigantes nacen de los fuertes vientos en las grandes tormentas. Las que avanzaban hacia Nazaré, a una velocidad de 35 nudos, venían de un vendaval desatado cuatro días antes a unos 5000 kilómetros de distancia, entre Terranova y Groenlandia. Koxa se preparó para su llegada gracias a los avances que los pronósticos para surfistas han experimentado durante la última década. Las generaciones anteriores de modelos consumían una ingente cantidad de datos —en tiempo real o recientes, tomados por satélites, barcos o boyas— de los vientos y mares de fondo. La predicción de la llegada de grandes olas a la costa se basaba en la interacción de esos elementos con el fondo marino.

La precisión de los modelos globales del viento y de las olas ha mejorado a medida que unos superordenadores cada vez más potentes han ido asimilando toda clase de datos, ya sea sobre olas capilares de centímetros de altura medidas por satélites, sobre las corrientes de marea, o sobre el arrastre diferencial del viento cuando sopla sobre hielo o sobre agua.

También conocemos mejor cómo afecta el fondo marino cercano al litoral a las olas que rompen. En Nazaré se halla uno de los cañones submarinos más abruptos del mundo: alcanza 4800 metros de profundidad, se extiende a lo largo de más de 200 kilómetros de plataforma continental y hace de embudo hacia un promontorio de la costa. Enfoca las olas como una lente la luz: concentra su energía a medida que el lecho marino fuerza su ascenso, hasta que el momento lineal del agua engendra la ola monstruosa.

Hendrik Tolman, exdirector del Centro de Modelización Ambiental de la NOAA, señala que los modelos todavía tropiezan en áreas geográficas pequeñas, como Nazaré. La menor diferencia en la dirección del oleaje o en la fase de la marea cambia la altura de las olas. Aquí es donde entra el aprendizaje automático, que combina las enormes cantidades de datos anteriores con observaciones actuales para pronosticar las olas futuras. En un estudio realizado por IBM el año pasado en la bahía californiana de Monterrey, se recopilaron en una hoja de cálculo de 11.078 filas y 741 columnas los datos meteorológicos y de olas que la NOAA había registrado hora a hora entre 2013 y 2017. Al combinarlos con las observaciones actuales, el sistema de inteligencia artificial mejoró en un 12.000 por ciento la eficiencia con respecto a los modelos que solo dependen de la física de las olas y de la dinámica meteorológica. Dentro de poco, los usuarios podrán modelizar las olas en sus propias ubicaciones con sus tabletas.

Para mejorar los pronósticos en puntos específicos, Ben Freeston, fundador del portal de surf Magicseaweed y director de ciencia de datos de Surfline, y Mark Willis, director de predicciones de Surfline, crean una red neuronal que se nutre de los datos que aportan las cámaras de los surfistas, los informadores remunerados de Surfline e incluso las redes sociales. Según Freeston, los surfistas de Nazaré y de otros lugares de gran oleaje comenzarán pronto a proporcionar datos. Fuera de la zona del oleaje, se distribuirán boyas diminutas que informarán sobre el mar de fondo a los teléfonos móviles de los surfistas. «Las boyas de la NOAA cuestan entre 50.000 y 60.000 dólares; estas, 99», asegura. «El volumen de datos aumentará exponencialmente.»

SURFEANDO SOBRE UN SUEÑO

Pero la tecnología no ayuda al surfista una vez en el agua. Por la mañana, tras la noche en vela de Koxa, el mar de fondo se aproximaba a la costa de Nazaré desde el noroeste, una dirección ideal para que el cañón aplicara su magia.

Koxa y Sergio Cosme, que pilotaba la moto de agua, dieron vueltas lejos de las olas durante una hora y media sin que Koxa se montara en ninguna. Finalmente, Cosme le advirtió de que se aproximaba un gran tren de olas. Koxa sabía que el aire de la costa volvería muy turbulenta la primera ola, así que se contuvo. La segunda tenía una superficie más limpia. Y llegó la tercera. «Suave, cristalina y preciosa», describe Koxa. «Era enorme. Solo la miré una vez y no quise volver a verla, porque si lo hacía tal vez no querría ir.»

Cosme remontó a Koxa hasta la cúspide de esa ola, cuya potencia tal vez alcanzase los miles de millones de vatios. Cuando Koxa se soltó, siete pisos más arriba, volvió a decirse: «Tienes que tirar justo hacia abajo». «En ese momento corro solo para salvarme. Tantísima energía. Nunca me he deslizado tan rápido sobre una tabla de surf. De repente, estoy en la sombra de la ola. Siento la oscuridad detrás de mí. Pero llevo la suficiente velocidad, creo que voy a superarla. Y lo hago. ¡Dios mío, acabo de hacer la ola de mi vida!», rememora.

Había batido el récord mundial: la ola alcanzó 24,4 metros de altura desde la base hasta la cresta, según determinaron in situ los jueces mediante análisis fotográficos. Unos meses más tarde, Koxa explicó cómo se habían combinado la tecnología de pronósticos, la experiencia como surfista y el coraje: «Fue un sueño hecho realidad».

Chris Dixon es escritor y autor de *Ghost wave: The discovery of the Cortes Bank and the biggest wave on Earth* (Chronicle Books, 2011).



PARA SABER MÁS

Informes y pronósticos de surf Magicseaweed: **www.magicseaweed.com**
Portal y pronóstico de olas Surfline: **www.surfline.com**

EN NUESTRO ARCHIVO

Olas destructivas en el Ártico. Mark Harris en *IyC*, octubre de 2015.



ANTROPOLOGÍA

NEANDERTALES Y HUMANOS MODERNOS EN LA PENÍNSULA IBÉRICA: ENCUENTROS Y DESENCUENTROS

Los cambios biológicos y culturales que se produjeron en Europa hace unos 40.000 años, con la llegada de los humanos modernos y la extinción de los neandertales, son objeto de un intenso debate, en el que la península ibérica desempeña un papel fundamental

Manuel Vaquero



¿HABÍAN DESAPARECIDO los neandertales (*derecha*) cuando llegaron los humanos modernos (*izquierda*) a la península ibérica? Los diversos hallazgos arqueológicos y paleontológicos realizados en nuestro territorio no ofrecen, de momento, una respuesta contundente.

Hace unos 40.000 años se produjo en Europa uno de los episodios de cambio más trascendentales de la historia de la humanidad, tanto desde un punto de vista biológico como cultural. Por un lado, desaparecieron los neandertales (*Homo neanderthalensis*), que habían habitado Europa desde hacía más de 300.000 años, y llegaron los humanos anatómicamente modernos (*Homo sapiens*), los cuales habían evolucionado en África e iniciado su dispersión por el resto de los continentes. Por otro lado, se produjo el paso del Paleolítico medio al Paleolítico superior. Tal paso se corresponde con una modificación sustancial en numerosos aspectos de la cultura material, desde la fabricación de herramientas hasta la expresión simbólica, y refleja transformaciones notables en las relaciones sociales y en la organización de los grupos humanos.

Hay quien ha caracterizado esta serie de cambios como una auténtica revolución humana, equiparable por su trascendencia a otros episodios posteriores, como las revoluciones Neolítica o Industrial. Pero, a diferencia de estas, la primera tiene el interés añadido de presentar una combinación de aspectos biológicos y culturales, lo que pone encima de la mesa el debate sobre los fundamentos biológicos y genéticos del comportamiento. Está ampliamente extendida la opinión de que la causa última de esa transformación radicaría en que los neandertales carecerían de las capacidades cognitivas y conductuales para desarrollar un comportamiento plenamente moderno, razón por la cual no pudieron competir con el recién llegado *Homo sapiens*. En cambio, algunos piensan que las causas hay que buscarlas en dinámicas sociales y económicas similares a las que han generado otras grandes transformaciones a lo largo de la Historia.

Este ha sido uno de los aspectos principales en la investigación antropológica y arqueológica desde siempre, pero especialmente a partir de los años ochenta del siglo pasado, cuando los avances en el campo de la datación radiométrica comenzaron a construir un marco cronológico relativamente preciso. Las dataciones son importantes porque determinan una de las cuestiones esenciales desde los inicios del debate: ¿llegaron a coexistir las poblaciones de neandertales y humanos modernos en algunas regiones de Europa? Y, en caso afirmativo, ¿qué clase de relaciones se establecieron entre ellos? ¿Se evitaron mutuamente como especies sin nada en común e incapaces de

Manuel Vaquero Rodríguez es investigador del Instituto Catalán de Paleoecología Humana y Evolución Social. Su actividad se centra en el estudio arqueológico de las poblaciones paleolíticas y mesolíticas. Ha dirigido excavaciones en distintos yacimientos de la península ibérica correspondientes al Paleolítico medio, al Paleolítico superior y al Mesolítico.



comunicarse? ¿O, al contrario, llegaron a producirse contactos con consecuencias desde el punto de vista genético o cultural? En última instancia, ¿qué función cumplió el *Homo sapiens* en la extinción de los neandertales?

Las investigaciones llevadas a cabo en los últimos 30 años han permitido resolver alguno de esos interrogantes, pero hay que reconocer que sobre la mayoría de ellos seguimos discutiendo y carecemos de respuestas que sean aceptadas por el conjunto de la comunidad científica.

La península ibérica ha desempeñando un papel central en esta controversia, sobre todo con respecto a una de las cuestiones fundamentales enunciadas: la de la posible contemporaneidad o coexistencia de las dos especies. Algunos datos publicados en los años 80 y 90 del siglo pasado sugerían un largo período de coexistencia a escala peninsular. Esto abría la puerta a una interacción muy prolongada entre ambas poblaciones, con implicaciones tanto a nivel genético como cultural. No obstante, el desarrollo de la investigación a lo largo de los últimos años no ha acabado de confirmar de forma clara dicha coexistencia, por lo que el grado de interrelación entre neandertales y humanos modernos en la península ibérica sigue siendo actualmente objeto de controversia.

CONOCER LA ANTIGÜEDAD DE LOS RESTOS

Antes de entrar de lleno en el tema, vale la pena hacer hincapié en el modo en que se identifica la presencia de una población humana en un yacimiento. Aunque en algunos se han encontrado fósiles humanos, ello no es lo habitual. Normalmente, la atribución de un conjunto arqueológico a los neandertales o a los humanos modernos se realiza en función de la industria lítica, es decir, de las características morfológicas de los artefactos de piedra encontrados en el yacimiento.

Dejando a un lado de momento los denominados tecnocomplejos de transición, los neandertales se asocian a los conjuntos del Paleolítico medio, con una industria lítica que se halla presente en Europa desde hace al menos unos 300.000 años y que se caracteriza por la producción de lascas —obtenidas a menudo con métodos de talla complejos— y un espectro de útiles relativamente reducido y poco especializado, entre los que destacan las raederas y los denticulados. En cambio, los humanos modernos se relacionan con el Paleolítico superior, cuya industria lítica se caracteriza por elementos alargados —láminas y laminitas— y por útiles diversificados y estandarizados, fabricados para actividades específicas. Además, en el Paleolítico superior aparecen elementos poco frecuentes o completamente desconocidos en el Paleolítico medio, como la industria en hueso, los objetos de adorno personal y, sobre todo, las manifestaciones artísticas. En el debate que nos ocupa, se tiende a considerar que la aparición del primero de los grandes tecnocomplejos del Paleolítico superior, lo que se conoce como cultura auriñaciense, marca la llegada de las poblaciones de humanos modernos.

Actualmente, la manera más habitual de determinar la edad de un conjunto arqueológico es la datación de los restos encontrados en el estrato del que procede dicho conjunto. Aunque los métodos de datación son muy diversos (luminiscencia, uranio-torio, resonancia de espín electrónico, etcétera), el principal es el carbono 14, o radiocarbono, que se aplica a los restos biológicos, como carbones y huesos de animales o humanos.

Las cuestiones cronológicas han desempeñado siempre un papel fundamental en toda la controversia sobre la coexistencia entre las dos especies, especialmente en la península ibérica. La fiabilidad de las dataciones de ciertos yacimientos se ha puesto en entredicho, sobre todo a medida que se han producido avances en el campo de la datación radiométrica. De hecho, el debate en sí ha contribuido a mejorar los procedimientos relacionados con la obtención de fechas, tanto en lo que respecta a la selección de las muestras como al propio método de datación.

A finales de los años ochenta y principios de los noventa, la publicación de las primeras fechas de, por un lado, conjuntos auriñacienses —asociados a priori a humanos modernos— y, por otro, conjuntos del final del Paleolítico medio —asociados a neandertales— arrojó resultados sorprendentes. La datación por radiocarbono de carbones encontrados en niveles auriñacienses de las cuevas de El Castillo, en Cantabria, y de L'Arbreda, en Gerona, indicaba que tenían una antigüedad de al menos unos 42.000 o 43.000 años. Ello sugería que los humanos modernos ya estaban presentes en el norte de Iberia en esas fechas.

Por otra parte, las fechas obtenidas para los conjuntos líticos de yacimientos del sur de la península parecían confirmar una hipótesis que ya se había planteado previamente a partir de interpretaciones paleoclimáticas (según las características sedimentarias de los estratos) en yacimientos como la Cova Negra, en Valencia, o la cueva de la Carihuela, en Granada: que los neandertales pervivieron en estos territorios hasta hace unos 34.000 años. Varios yacimientos contaban en ese momento con fechas muy recientes (entre 34.000 y 38.000 años) para niveles con industrias del Paleolítico medio: Jarama VI, en Guadalajara, y las cuevas Foz do Enxarrique, de Caldeirão, de Oliveira y Gruta Nova da Columbeira, en Portugal. Resultó particularmente determinante la datación de la cueva del Boquete de Zafarraya,

EN SÍNTESIS

Hasta hace poco, los datos sugerían que los neandertales y los humanos modernos coexistieron en la península ibérica durante unos diez milenios, lo que aumentaba la posibilidad de que se hubieran dado contactos entre ambos y permitía plantear hipótesis sobre la causa de la extinción de los neandertales.

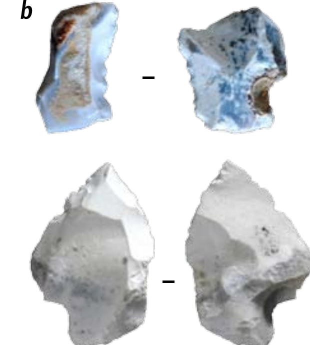
Sin embargo, las dataciones más precisas de los últimos años y las escasas pruebas de los contactos reflejados en la cultura material (principalmente, herramientas de piedra) han reducido esa posibilidad.

El futuro hallazgo de restos de la industria lítica o de fósiles de neandertales y humanos modernos correspondientes al período crítico de transición podría resolver muchos de los interrogantes abiertos acerca de la convivencia o no de ambas poblaciones.

Cultura material de neandertales y humanos

Una de las principales maneras de identificar la presencia en el pasado de neandertales o de humanos modernos en un determinado lugar se ha basado en el hallazgo y la descripción de restos de su cultura material, los cuales resultan mucho más abundantes que los huesos fósiles correspondientes al supuesto momento de su coexistencia en la península ibérica. Normalmente se asigna la industria lítica del Paleolítico medio a los neandertales y la del Paleolítico superior a los humanos modernos, aunque tal asignación no siempre resulta fácil porque a menudo los restos son escasos y aparecen mezclados entre sí o con elementos de transición.





Neandertales

Descritos tradicionalmente como seres simiescos, las últimas reconstrucciones, más realistas, dan una imagen mucho más humanizada de los neandertales, capaces de hacer fuego y fabricar herramientas para la caza (*a*). Los útiles con filo denticulado, poco especializados, son característicos del Paleolítico medio y se han descubierto en numerosos yacimientos de la península ibérica (*b*).



Humanos modernos

Su llegada a Europa supuso una auténtica explosión simbólica. Además de representaciones artísticas en las paredes de las cuevas (*c*), uno de los aspectos más característicos del Paleolítico superior es el hallazgo de objetos de adorno personal, elementos perforados utilizados como colgantes, como estas conchas (*d*). Los útiles típicos de ese período incluyen láminas y laminitas diversas fabricadas para un determinado uso (*e*).







WIKIMEDIA COMMONS/DOMINIO PÚBLICO (*escenas de neandertales y humanos modernos de Charles R. Knight*); MANUEL VAQUERO (*utensilios y abalorios*)

en Málaga, ya que este yacimiento contaba con industrias líticas típicas del Paleolítico medio, pero también con restos fósiles de neandertales. Las fechas en torno a los 35.000-37.000 años de antigüedad obtenidas a partir de huesos de animales que se hallaban junto a los fósiles y las herramientas en Zafarraya parecían demostrar de forma contundente la prolongada pervivencia de los neandertales en el sur.

Asimismo, el inicio del Paleolítico superior en el sur parecía corresponder a momentos relativamente avanzados. Se habían hallado útiles característicos del Auriñaciense evolucionado y del Gravetiense (cultura posterior al Auriñaciense), pero, en cambio, no aparecían los propios de las fases iniciales (Protoauriñaciense y Auriñaciense antiguo), lo que parecía indicar una llegada relativamente tardía de los humanos modernos.

Utilizando argumentos tafonómicos, relacionados con los procesos de formación y alteración de los estratos donde se hallaban los útiles, João Zilhão, de la Universidad de Barcelona, y Francesco d'Errico, de la Universidad de Burdeos, pusieron en duda la antigüedad de las fechas de El Castillo y L'Arbreda y plantearon que la llegada del Auriñaciense (y por lo tanto de los humanos modernos) a la península ibérica se habría producido hace unos 41.000 años, más tarde que las fechas previamente estimadas.

No obstante, ello no modificaba sustancialmente la conclusión principal que se desprendía de las fechas disponibles en ese momento: la coexistencia a escala peninsular de poblaciones de neandertales y *Homo sapiens* durante un período de casi diez milenios.

LA HIPÓTESIS DE LA FRONTERA DEL EBRO

Este marco cronológico dio origen a la hipótesis de la frontera del Ebro. Según esta, los humanos modernos habrían llegado al extremo norte de Iberia (región cantábrica, norte de Aragón y Cataluña) en los momentos iniciales de su expansión por Europa. Sin embargo, en lugar de continuar su dispersión por el resto de la península, se detuvieron en las regiones del norte, donde permanecieron hasta que, varios miles de años más tarde, decidieron reanudar su expansión hacia el sur. Esto se explicaría por las diferentes condiciones ambientales imperantes en cada zona de la península. Tras su recorrido por el continente europeo, los humanos modernos estarían especialmente adaptados a los ambientes abiertos y de estepa que ya serían dominantes en esa época en el norte de Iberia, donde podrían desarrollar sus estrategias de subsistencia basadas en la caza de mamíferos adaptados a condiciones frías. En cambio, las condiciones más templadas del resto de la península les resultarían poco atractivas para su forma de vida. Ello habría permitido a los neandertales peninsulares, bien adaptados a los ambientes del sur, sobrevivir durante mucho más tiempo que sus congéneres europeos. Cuando el clima empeoró también en la parte meridional de la península, las poblaciones de humanos modernos iniciaron su expansión hacia el sur, provocando con ello la extinción definitiva de los neandertales.

Pero ¿de qué forma se produjo esa extinción? ¿Tuvo *Homo sapiens* un papel activo? La etnografía y la historia nos proporcionan numerosos ejemplos de cómo poblaciones colonizadoras acabaron desplazando a comunidades autóctonas con un menor grado de desarrollo tecnológico, provocando en algunos casos su desaparición. En general, se piensa que la llegada de los humanos modernos generó una competencia por el acceso a los recursos, ante la cual los neandertales, menos avanzados tecnológica y socialmente, se vieron obligados a ir retrocediendo de forma progresiva hasta su extinción.

No obstante, no siempre es fácil identificar esa mayor capacidad de adaptación en los conjuntos arqueológicos producidos por *Homo sapiens*. En algunas regiones, la subsistencia de los primeros humanos modernos no fue muy diferente a la de los últimos neandertales, basada en la caza de mamíferos de tamaño grande y medio (ciervos, caballos, bóvidos). En cambio, en otros casos sí se aprecia una diferencia sustancial. En la vertiente mediterránea de la península, el Paleolítico superior suele caracterizarse, desde sus inicios, por la explotación de pequeños animales, principalmente conejos. En el primer nivel auriñaciense de L'Arbreda, este animal representa más del 90 por ciento de los restos óseos. El aprovechamiento de recursos de tamaño reducido era mucho menos habitual entre las poblaciones neandertales, si bien se ha documentado de forma puntual en algunos yacimientos. Esta podría ser una muestra de la capacidad de los humanos modernos para aprovechar de forma más eficiente las fuentes de alimento del entorno.

Sin embargo, no todos los expertos coinciden en que la extinción de los neandertales fuese debida a sus problemas para competir con los humanos modernos. Hay quien lo atribuye a dinámicas que no tienen nada que ver con la llegada del *Homo sapiens*. Según Clive Finlayson, del Museo de Gibraltar, el deterioro y la inestabilidad del clima llevaron a una fragmentación de las sociedades neandertales, lo cual, junto con una densidad de población muy baja, acabó provocando la crisis demográfica que culminó con su extinción. Según esa idea, cuando los humanos modernos llegaron al sur de la península se encontraron con un territorio vacío.

HIBRIDACIÓN EN LA PENÍNSULA

Sin embargo, la extinción no es el único escenario que podemos contemplar para los neandertales peninsulares. Aunque ocupasen territorios diferentes, la coexistencia de humanos modernos y neandertales durante varios milenios habría favorecido su contacto, especialmente en las zonas de frontera entre ambas poblaciones. En este contexto, no puede descartarse que algunas poblaciones de neandertales fuesen asimiladas por los humanos modernos. De hecho, la posibilidad de que se produjesen contactos sexuales y que estos diesen origen a descendencia fértil ha sido uno de los grandes interrogantes relacionados con este debate. Hay que tener en cuenta que, para muchos investigadores, *Homo neanderthalensis* y *Homo sapiens* eran especies diferentes, lo que descartaría de entrada la existencia de híbridos con capacidad reproductiva, mientras que para otros, neandertales y humanos modernos debían de considerarse como subespecies de la misma especie (*Homo sapiens neanderthalensis* y *Homo sapiens sapiens*), lo que abría la puerta a una hibridación fértil.

Para dilucidar esta cuestión, los análisis de ADN nuclear y mitocondrial, tanto de restos fósiles como de poblaciones actuales, han sido fundamentales. Si bien los primeros estudios parecían descartar la posibilidad de que se produjeran fenómenos de hibridación entre neandertales y humanos modernos, los trabajos publicados en los últimos años han cambiado radicalmente el panorama. El ADN de los europeos actuales incluye un pequeño porcentaje de genes heredados de los neandertales. Esto indica que, en su dispersión por los continentes, los humanos modernos se cruzaron con otras poblaciones, no solamente con los neandertales, sino también con otros homínidos arcaicos, como los denisovanos. Esta herencia neandertal no se ha encontrado solamente en individuos actuales. Del 6 al 9 por ciento del genoma de un humano moderno, cuyos restos se hallaron en una cueva de Rumanía (Peştera cu Oase) y que se dataron en unos 37.000-42.000 años de antigüedad, procede de los neandertales. Otros datos publicados recientemente sugieren, además, que el cruce entre neandertales y *Homo sapiens* no se produjo en un único episodio, sino que tuvo lugar en diferentes momentos y lugares.

Antes de que la paleogenética proporcionase estas contundentes pruebas de la relación entre neandertales y humanos modernos, la existencia de fenómenos de hibridación ya había sido sugerida a partir del estudio anatómico de restos fósiles. Uno de los ejemplos más conocidos procede de la península ibérica. Los restos de un niño de 4 o 5 años de edad descubiertos en 1998 en el yacimiento de Lagar Velho, en el centro de Portugal, presentaban un mosaico de características que fueron interpretadas como el resultado de la hibridación entre ambas poblaciones. Si bien no existen dudas sobre la asignación de este fósil a *Homo sapiens*, también presenta algunos caracteres que, según Erik Trinkaus, de la Universidad de Washington en San Luis, y Zilhão, son claramente derivados de los neandertales. La antigüedad del enterramiento, estimada mediante radiocarbono hace entre unos 28.500 y 30.000 años, sugiere que esos caracteres aún se conservaban varios milenios después de la desaparición de los neandertales y de su contacto con las poblaciones de humanos modernos.

INDICIOS DE TRANSICIÓN CULTURAL

No obstante, los contactos entre neandertales y humanos modernos son difíciles de rastrear en la cultura material. Se trata de un tema complejo de abordar, ya que las relaciones culturales pueden manifestarse de formas muy diversas, tal como indican los ejemplos etnográficos.

A menudo se ha considerado que una prueba de los contactos culturales entre las dos poblaciones sería la aparición de conjuntos arqueológicos enraizados en el Paleolítico medio, pero que a la vez cuentan con algunos elementos característicos del Paleolítico superior. Esto ha llevado a definir en distintas regiones europeas lo que se conoce como tecnocomplejos de transición, entre los cuales el mejor conocido es el Chatelperroniense, bien documentado sobre todo en Francia y con algunos datos en la península ibérica. En los yacimientos franceses de la Grotte du Rene y Saint-Césaire, el Chatelperroniense está asociado a restos fósiles de neandertales (aunque dicha asociación ha sido recientemente puesta en duda y hay quien no descarta que en realidad pueda corresponder a humanos modernos). Esa cultura material cuenta con buena parte de los aspectos definitorios del Paleolítico superior: tecnología de producción laminar, diversidad y estandarización de artefactos, objetos de adorno personal y artefactos en hueso y asta.

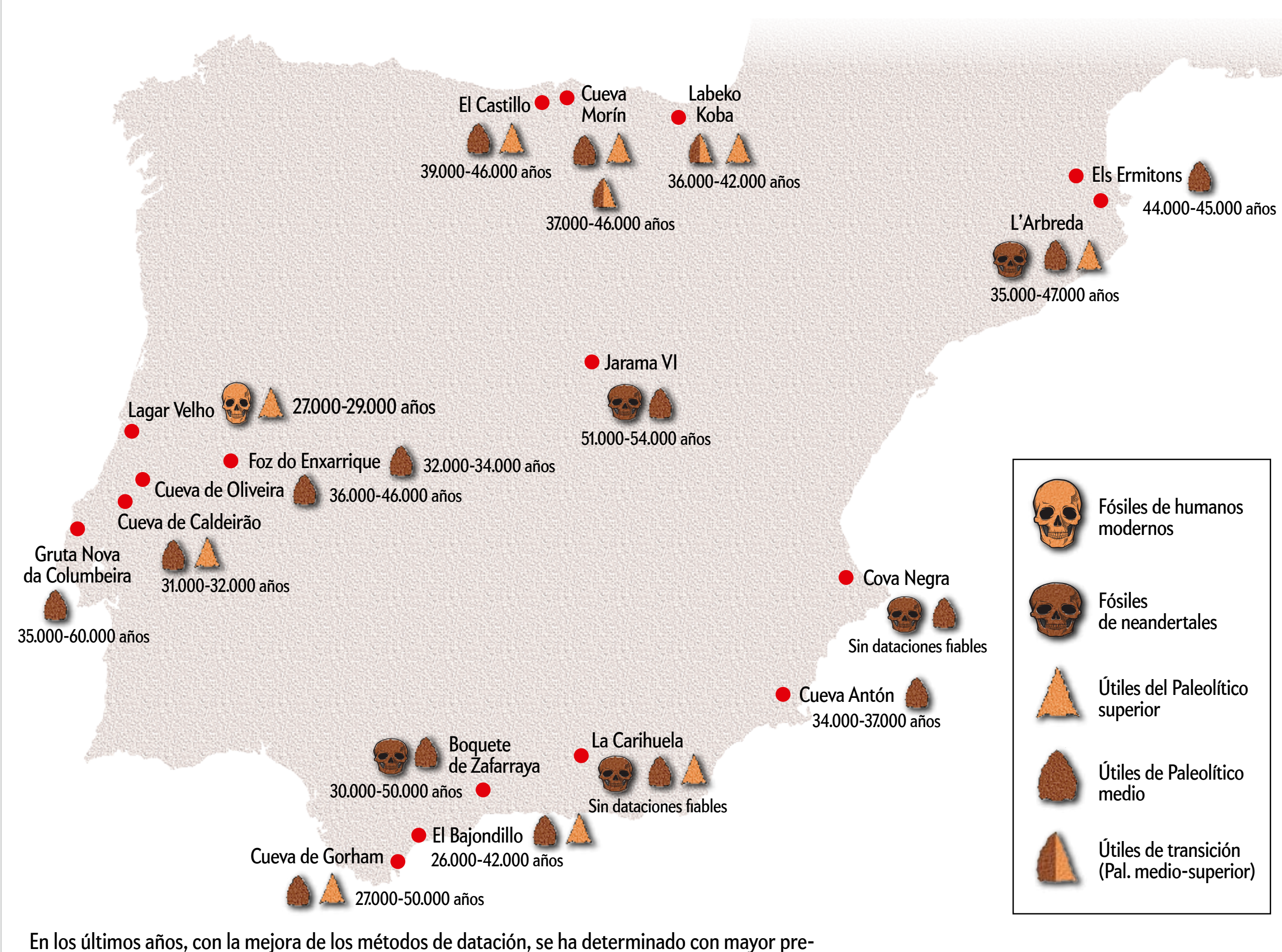
Para algunos investigadores, estos conjuntos son el resultado de la aculturación de los neandertales por parte de los humanos modernos, lo que solo se entiende en el marco de una coexistencia entre ambas poblaciones. No obstante, tanto esta interpretación como la cronología del Chatelperroniense ha sido objeto de un intenso debate. Otros investigadores sugieren que estos conjuntos de transición son el resultado de dinámicas de cambio surgidas en el seno de las comunidades neandertales, sin necesidad de ninguna influencia de los humanos modernos.

Con independencia de su origen o cronología, los tecnocomplejos de transición son poco habituales en la península ibérica, particularmente en las regiones del centro y del sur,

UN PUZLE INCOMPLETO

Geografía de la coexistencia

La península ibérica ocupa un lugar prominente en el debate sobre la convivencia entre neandertales y humanos modernos, puesto que, según algunos investigadores, es una de las zonas de Europa donde más tiempo pervivieron los primeros cuando ya habían llegado los segundos. Pero el período de esa coexistencia a escala peninsular, inferior a los 10.000 años, es relativamente corto si se tiene en cuenta la escasez de las pruebas y la imprecisión en la datación de los restos. Abajo se recogen las distintas pruebas con las que se cuenta para reconstruir ese complejo puzle, halladas en los yacimientos que más información nos aportan sobre ese período crítico.



En los últimos años, con la mejora de los métodos de datación, se ha determinado con mayor precisión la antigüedad de los restos hallados en los yacimientos (*fechas entre paréntesis*). Se ha estimado así que la presencia de los neandertales en distintos lugares era más antigua de lo que se pensaba en el pasado, lo que ha rebajado la posibilidad de la convivencia de ambas poblaciones.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, SEGÚN EL AUTOR



CUEVA DE GORHAM, en Gibraltar: En este yacimiento se han encontrado niveles atribuidos al Paleolítico medio con fechas muy recientes, que avalarían la larga pervivencia de los neandertales en el sur de la península ibérica.

en las que, según el modelo de la Frontera del Ebro, más se prolongó la pervivencia de los neandertales y, por tanto, más tiempo habrían estado expuestos a las influencias culturales de los humanos modernos. El Chatelperroniense solo se ha documentado en el norte, precisamente en aquellas zonas que primero fueron ocupadas por *Homo sapiens* y donde antes se habría producido la desaparición de los neandertales. Entre los escasos yacimientos que han proporcionado pruebas de este tecnocomplejo se encuentran la cueva de Morín, en Cantabria, Labeko Koba, en Guipúzcoa, y las cuevas de L'Arbreda y de Els Ermitons, en Gerona. Se trata en general de conjuntos pobres o en los que los artefactos típicos del Paleolítico superior son poco abundantes, lo que contrasta con los ricos conjuntos chatelperronienses hallados en Francia.

Además, estas dinámicas autóctonas de cambio cultural no parecen habituales en el conjunto de la península, y la gran mayoría de los conjuntos del final del Paleolítico medio no muestran ninguna tendencia evolutiva en la línea del Paleolítico superior. De esto se desprende que los contactos entre neandertales y humanos modernos en nuestra región tuvieron pocas consecuencias en el ámbito de la cultura material.

DATACIONES MÁS PRECISAS

En este contexto, la hipótesis de la Frontera del Ebro empezó a mostrar puntos débiles. Aunque parecía bien contrastada y era aceptada por una buena parte de la comunidad científica, existían dudas razonables sobre la validez de algunos de los datos que la sustentaban. Algunos de estos interrogantes estaban relacionados con la cronología de los yacimientos que demostraban la pervivencia de los neandertales en los territorios situados al sur del Ebro. Varias cuestiones se ponían en entredicho: la asociación entre las muestras de hueso y carbón datadas y la cultura material; la antigüedad de algunas excavaciones, por ser menos precisas que las actuales tanto en la recogida de los restos como en la definición de las secuencias estratigráficas; el método de datación empleado (en el caso de las fechas obtenidas antes de finales de los años ochenta); o la propia caracterización cultural de algunos conjuntos que habían proporcionado un número muy limitado de restos.

Los avances en los métodos de datación por carbono 14 contribuyeron a resolver algunas de estas cuestiones. El protocolo de la ultrafiltración aplicado a las muestras de hueso, desarrollado en los últimos años por laboratorios como el de la Universidad de Oxford, permite eliminar la contaminación por carbonatos o ácidos húmicos (procedentes de materiales más recientes) de las muestras de hueso en mayor medida que los procedimientos tradicionales. Esto se traduce en dataciones más fiables, que suelen ser más antiguas que las realizadas sin el uso de este protocolo. De la misma manera, las muestras de carbón tratado con el método de oxidación-ácido-base (ABOx) tienden a proporcionar fechas más antiguas que la procesadas mediante el clásico método ácido-base-ácido (ABA). Hay que tener en cuenta que la transición entre el Paleolítico medio y el superior se encuentra cerca del límite de aplicación del método del carbono 14, por lo que pequeñas cantidades de contaminación pueden rejuvenecer en bastantes milenios el resultado de la datación. En consecuencia, algunos investigadores piensan que todas las fechas obtenidas con anterioridad al uso de los nuevos protocolos de tratamiento de las muestras deben considerarse como fechas mínimas.

Al aplicar los nuevos procedimientos en algunos de los yacimientos del sur peninsular que habían servido de base a la hipótesis de la Frontera del Ebro, se comprobó que el final del Paleolítico medio, y por consiguiente de los neandertales, no había sido tan reciente como se pensaba, hace solo unos 35.000 años. Ese fue el caso de Jarama VI, en Guadalajara, al que se había atribuido unos 36.000-33.000 años de antigüedad, pero que los nuevos métodos le asignaban más de 50.000. Asimismo, los niveles del Paleolítico medio de Gruta Nova de Columbeira, datados en 26.000 años de antigüedad en los años sesenta y setenta, se ha constatado ahora que superan los 80.000 años. Pero sin duda la principal novedad fue la revisión de la cronología del Boquete de Zafarraya. Las numerosas fechas publicadas durante los últimos años no han podido confirmar la antigüedad del yacimiento inicialmente estimada (unos 36.000 años) y sugiere que lo más probable es que los restos de neandertales hallados en la cueva superen los 50.000 años de edad.

INTERROGANTES ABIERTOS

La revisión de la cronología de estos yacimientos ha restado apoyo empírico a la idea de la pervivencia del Paleolítico medio, y por tanto de los neandertales, en el sur de Iberia hasta momentos muy posteriores a los de la llegada de los humanos modernos al norte de la península.



Es cierto que estas fechas recientes aún se mantienen para otros yacimientos, como las cuevas de Oliveira y de Gorham y Cueva Antón, en Murcia, pero se trata de conjuntos en los que la atribución a neandertales se ha realizado exclusivamente a partir de la industria lítica, que en algunos casos, como la cueva de Gorham y Cueva Antón, es escasa.

A esto hay que añadir la posibilidad de que el inicio del Paleolítico superior en el sur de Iberia no sea tampoco tan reciente como se había pensado. En el estrato 11 de la cueva de El Bajondillo, en Málaga, se encontró un conjunto auriñaciense datado en hace unos 37.000 años, una fecha solo unos 4000 años posterior a las comúnmente aceptadas para el inicio del Auriñaciense en la región cantábrica y Cataluña, lo que reduciría sensiblemente el desfase norte-sur en la llegada de los humanos modernos. El hallazgo auriñaciense en Andalucía, donde dicho tecnocomplejo era prácticamente desconocido, nos obliga a cuestionarnos hasta qué punto las hipótesis sobre las que discutimos están condicionadas por el reducido número de pruebas con las que trabajamos.

En cualquier caso, tanto el envejecimiento de ciertos yacimientos del Paleolítico medio como el descubrimiento de restos del Auriñaciense en el sur han tenido como consecuencia que la hipótesis de una coexistencia prolongada de ambas poblaciones a escala peninsular haya perdido peso en los últimos años.

Un buen ejemplo de la complejidad que se deriva de la escasez de datos lo tenemos en dos de los yacimientos para los que se mantiene la hipótesis del Paleolítico medio reciente: la cueva de Gorham y Cueva Antón. En ambos conjuntos, atribuidos por sus excavadores a neandertales, se han encontrado huellas de comportamiento simbólico que hasta ahora se consideraban más propias de los humanos modernos. En la cueva de Gorham se descubrió, grabado en la roca, un motivo esquemático que estaba cubierto por un nivel datado en hace entre 30.500 y 38.500 años, lo que significa que el grabado es anterior a estas fechas. En Cueva Antón se recuperó, en un nivel datado en torno a los 37.000 años de antigüedad, una concha de *Pectem maximus* con impregnaciones de colorante rojo que fue interpretada como un elemento utilizado en el procesamiento del ocre, tal vez en el marco de actividades con contenido simbólico.

La aparición de estos comportamientos en el contexto del Paleolítico medio reciente en el sur de la península abre una serie de cuestiones interesantes: ¿son estas posibles muestras de simbolismo una consecuencia del contacto con los humanos modernos? ¿Responden a innovaciones surgidas de forma independiente en el seno de las últimas comunidades de neandertales? ¿Fue el desarrollo de comportamientos simbólicos una forma de responder a las tensiones generadas por la llegada de los humanos modernos?

No obstante, en el caso de la cueva de Gorham y Cueva Antón hay otros interrogantes que no podemos eludir. Teniendo en cuenta el escaso número de efectivos que componen sus conjuntos líticos, ¿podemos estar seguros de que fueron realizados por neandertales? En distintos yacimientos del Paleolítico superior se han documentado conjuntos de herramientas caracterizados por unas tecnologías simples y poco estandarizadas. En ellos, el porcentaje de artefactos propios del Paleolítico superior es relativamente bajo. En conjuntos con un escaso número de restos, el hallazgo de artefactos directores (cuya sola aparición sirve para atribuir un conjunto a dicha cultura o tecnocomplejo) es una cuestión puramente estadística. Si este fuera el caso de la cueva de Gorham y Cueva Antón, las manifestaciones simbólicas tendrían una significación completamente distinta, ya que no podría descartarse su atribución a humanos modernos.

Con independencia de la respuesta que podamos darles, estos interrogantes ponen de relieve lo exiguo de los datos con los que estamos trabajando y construyendo grandes teorías. No en vano, más de veinte años después de la hipótesis de la Frontera del Ebro, seguimos haciéndonos las mismas preguntas y esperando el dato que, finalmente, permita darles una respuesta definitiva... si es que eso, obviamente, existe en alguna parte.

La arqueología es una disciplina que siempre está a expensas de los nuevos descubrimientos que se vayan realizando en el futuro. Hay hallazgos que, de producirse, permitirían resolver muchas de las cuestiones que actualmente son objeto de debate o cambiarían de forma drástica los términos de la controversia. Por ejemplo, el hallazgo de industrias del Protoauriñaciense o del Auriñaciense antiguo en el sur de la península ofrecería una prueba contundente en contra de la hipótesis de la frontera del Ebro. Por el contrario, el descubrimiento en estos mismos territorios de industrias líticas del Paleolítico medio realmente diagnósticas o, más aún, de restos de neandertales con fechas recientes, contribuiría de modo decisivo a confirmarla. Encontrar más restos humanos, tanto de neandertales como de humanos modernos, correspondientes al período de la transición sería fundamental, sobre todo si resultan adecuados para el análisis de ADN, un ámbito de la investigación que está revolucionando el estudio de las poblaciones humanas de la prehistoria.

PARA SABER MÁS

Portrait of the artist as a child: The Gravettian human skeleton from the Abrigo do Lagar Velho and its archeological context. Dirigido por J. Zilhão y E. Trinkaus en *Trabalhos de Arqueologia*, n.º 22. Instituto Portugués de Arqueología, Lisboa. 2002.

Neandertal extinction and the millennial scale climatic variability of OIS 3. F. D'Errico y M. F. Sánchez Goñi en *Quaternary Science Reviews*, vol. 22, págs. 769-788, 2003.

Late survival of Neanderthals at the southernmost extreme of Europe. C. Finlayson et al. en *Nature*, vol. 443, págs. 850-853, 2006.

Radiocarbon dating casts doubt on the late chronology of the Middle to Upper Palaeolithic transition in southern Iberia. R. E. Wood et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 110, n.º 8, págs. 2781-2786, 2013.

Precise dating of the Middle-to-Upper Paleolithic transition in Murcia (Spain) supports late Neandertal persistence in Iberia. João Zilhão et al. en *Heliyon*, vol. 3, e00435, noviembre de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

La extinción de los neandertales. Kate Wong en *IyC*, octubre de 2009.

por Luis Cardona y Massimiliano Drago

Si eres investigador en el campo de las ciencias de la vida y la naturaleza, y tienes buenas fotografías que ilustren algún fenómeno de interés, te invitamos a participar en esta sección. Más información en **www.investigacionyciencia.es/decerca**

Archivos de pelo

Los tejidos queratinosos de los lobos marinos ofrecen información sobre su alimentación y su reproducción

Los lobos marinos, u otáridos, son depredadores de presas muy variadas y, debido al gran tamaño de sus numerosas poblaciones, suelen ser percibidos como competidores por los pescadores. Para valorar la cantidad y el tipo de presas que consumen y, por lo tanto, la intesidad del conflicto, necesitamos recabar información detallada acerca de su dieta, una tarea difícil, ya que pasan la mayor parte del año en el mar. Solo en los meses de verano se agregan en densas colonias para la reproducción, y en ese momento pueden obtenerse muestras biológicas para reconstruir diferentes aspectos de su conducta.

En nuestras investigaciones, realizadas principalmente en el Atlántico Sur, nos hemos fijado en los tejidos queratinosos (que constituyen los pelos de todos los animales). Se trata de tejidos fisiológicamente inertes una vez sintetizados, por lo que conservan inalterada la abundancia relativa de los isótopos estables (o razón isotópica) de los elementos que los forman, entre ellos el carbono, el nitrógeno y el azufre. Las razones isotópicas de los pelos de un lobo nos aportan información sobre su dieta, las zonas donde se alimenta e incluso su estado fisiológico. Ello ha permitido conocer de forma precisa diferentes aspectos de la biología de especies muy difíciles de estudiar de otro modo.

No obstante, no todos los tejidos queratinosos sirven por igual. Cada uno de los miles de pelos de los lobos crece durante unas pocas semanas, y las razones isotópicas integran lo sucedido durante dicho período. Lamentablemente, los otáridos no presentan un período de muda definido y no podemos saber la edad de cada pelo. Por consiguiente, las razones isotópicas del pelo no resultan muy útiles en este grupo de mamíferos.

Pero hay excepciones a esa norma. Una es el lanugo, el pelo que recubre a las crías de lobo recién nacidas. Este se forma unos dos meses antes del parto y su razón isotópica de carbono y de nitrógeno nos informa de la dieta de la madre durante la fase final de la gestación. Otra excepción son los largos pelos sensoriales del hocico, denominados vibrisas, que crecen a un ritmo constante durante varios años. Cada sección de 3 milímetros de vibrisa integra aproximadamente un mes de vida; por lo tanto, una que mida 15 centímetros proporcionará información sobre los últimos 50 meses de vida del animal. En el caso del lobo fino antártico, las vibrisas más largas pueden contener el registro de los últimos cinco años de vida.

Nuestros estudios han demostrado que la dieta varía con la edad y con el sexo, pero también entre adultos del mismo sexo. Además, la alimentación de las hembras influye notablemente en el crecimiento de las crías. Ahora, el reto pasa por integrar esta información en modelos ecosistémicos que permitan valorar y gestionar la presión de los lobos sobre sus presas.

—Luis Cardona y Massimiliano Drago
Instituto de Investigación de la Biodiversidad y Departamento de Biología Evolutiva, Ecología y Ciencias Ambientales
Universidad de Barcelona



LOS CAMBIOS en las razones isotópicas del carbono y del nitrógeno a lo largo de las vibrisas de las hembras, como esta de lobo marino de las Galápagos (*Zalophus wollebaeki*), indican los períodos que ha atravesado de gestación y lactancia, respectivamente, y permiten conocer su éxito reproductivo.



LAS VIBRISAS de los machos juveniles del lobo fino antártico (*Arctocephalus gazella*) registran un aumento de la razón isotópica del nitrógeno en su parte más antigua y luego un fuerte descenso. Estos cambios se corresponden, respectivamente, con la lactancia y el destete. La amplitud del descenso indica el tiempo que tardó cada ejemplar en alimentarse por sí mismo.

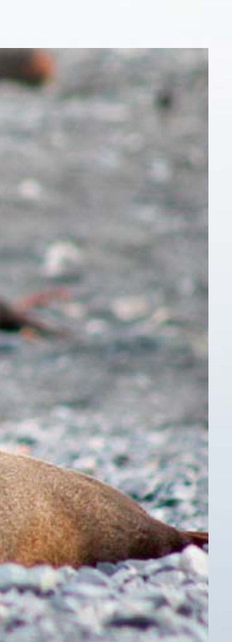


LOS LOBOS MARINOS SUDAMERICANOS (*Otaria flavescens*), igual que otros otáridos, se agregan en playas para reproducirse durante el verano austral. Allí son fáciles de capturar y muestrear, como en esta playa del norte de la Patagonia argentina.



LUIS CARDONA (*lobo fino antártico*); MASSIMILIANO DRAGO (*resto de las fotos*)

AL NACER, las crías están recubiertas por un pelaje negro que se ha formado un par de meses antes. Las relaciones isotópicas de este pelo nos informan sobre la dieta de la madre durante la fase final de la gestación.



LAS VIBRISAS de los machos adultos registran disminuciones periódicas de la razón isotópica del nitrógeno asociadas al ayuno durante la época de celo. Ello permite determinar la frecuencia del celo y su duración en los años previos al muestreo.



por Silvia De Bianchi

Silvia De Bianchi es investigadora Ramón y Cajal en el Departamento de Filosofía de la Universidad Autónoma de Barcelona y miembro del Centro de Historia de la Ciencia, de la misma universidad.



Cien años de *Espacio, tiempo y materia*

Figura clave en el desarrollo de la física del siglo XX, el matemático Hermann Weyl supo conjugar física, matemáticas y filosofía en un diálogo multidisciplinar

Aunque tal vez no se encuentre entre los más conocidos por el gran público, Hermann Weyl (1885-1955) fue una de las figuras más importantes de la física del siglo XX. Son esenciales sus contribuciones a la fundamentación de la mecánica cuántica, la comprensión del continuo matemático o el uso de la teoría de grupos de simetría en física. Tanto es así que, hoy, sus obras siguen ofreciéndonos la posibilidad de ampliar nuestro conocimiento de las teorías físicas y del universo en que vivimos. Este año hemos celebrado el centenario de *Espacio, tiempo y materia*, una obra ya clásica que ha dado pie a numerosos trabajos posteriores y a una nueva interpretación de las teorías físicas a partir del concepto de *Eichinvarianz*: «invariancia de escala», en una posible traducción literal, o «invariancia gauge», en lenguaje técnico.

Las teorías gauge proporcionan un marco unitario para la descripción de las teorías cuánticas de campos. El modelo estándar de las partículas elementales, el cual describe tres de las cuatro interacciones fundamentales de la naturaleza y todas las partículas elementales conocidas, es de hecho una teoría gauge. En la formulación de este tipo de teorías resulta imprescindible el uso de grupos de simetría (conjuntos de transformaciones matemáticas que, aplicadas a las ecuaciones fundamentales, las dejan invariantes), que en el caso del modelo estándar son los grupos denominados $SU(3)$, $SU(2)$ y $U(1)$. Fue precisamente Weyl quien conectó la idea de *Eichinvarianz* a los grupos de simetría y quien la aplicó a la electrodinámica cuántica en 1929.



HERMANN WEYL (1885-1955).

BIBLIOTECA DE LA ESCUELA POLITÉCNICA DE ZÚRICH, VÍA WIKIMEDIA COMMONS/DOMINIO PÚBLICO

Durante los años veinte, Weyl abandonó el propósito original de *Espacio, tiempo y materia*: describir geométricamente el campo electromagnético a fin de dar con una teoría del campo unificado. A partir de 1929, transfirió dicha intuición a la nueva teoría cuántica y su incipiente formulación relativista. En la cuarta edición inglesa de la obra (1952) expresó así tal cambio:

El principio de la relatividad general ha llevado a una teoría del campo gravitatorio. Pese a que las ecuaciones de Maxwell del campo electromagnético pueden adaptarse sin dificultad a dicho principio, ello no bastó para alcanzar el objetivo de la física clásica de campos: una teoría del campo unificado que permitiese deducir todas las fuerzas de la naturaleza a partir de una estructura común del mundo y de una única ley de acción. Intenté alcanzar ese objetivo mediante un nuevo principio, al que denominé invariancia gauge. Pero fracasé. Hoy sabemos que la naturaleza verifica un principio de invariancia gauge; sin embargo, no conecta los potenciales electromagnéticos φ_μ *con los potenciales gravitatorios de Einstein,* $g_{\mu\nu}$ *—como había supuesto—, sino que los vincula a las cuatro componentes de la ecuación de ondas que, según Schrödinger y Dirac, representa al electrón. ¡Por supuesto, nadie podía imaginarlo antes del descubrimiento del «campo de electrones»* ψ *por la mecánica cuántica!*

Influencia filosófica

La vida de Weyl es también un ejemplo de la influencia del curso de la historia en la investigación científica. Weyl obtuvo su máximo reconocimiento en 1930, cuando sucedió a David Hilbert en la cátedra de Gotinga, la posición de mayor prestigio para un matemático alemán. Con anterioridad había trabajado muchos años en la Escuela Politécnica Federal de Zúrich, junto a Einstein y

Schrödinger. Su mujer, Helene, estudió filosofía y literatura bajo la supervisión de Husserl. Como traductora, ejerció una notable influencia en las reflexiones filosóficas de Weyl.

La tranquilidad de la vida de los Weyl, sus viajes, sus paseos en las montañas y sus quehaceres académicos chocaron con la realidad de la ascensión al poder de Adolf Hitler y del partido nazi en 1933. Weyl tuvo que tomar una decisión: su mujer era judía y, por tanto, blanco de la propaganda nazi. Gracias a sus buenas relaciones con el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, Weyl y su esposa huyeron a Estados Unidos. Fueron acogidos en el prestigioso centro junto con otros científicos y académicos europeos, como Einstein. Más tarde, Weyl recordaría así aquel período en sus *Memorias*:

No podía soportar la idea de vivir bajo el yugo de un monstruo como Hitler, que había deshonrado el nombre de Alemania. Aunque el golpe fue duro y la agonía mental tan cruel que sufrí un serio colapso, tuve que sacudirme mi patria de encima.

Weyl tuvo así una doble vida, europea primero y americana después. Helene nunca abandonó su pasión por la filosofía, y acabo transmitiéndosela a su marido. Como muchos alemanes de su generación, Weyl había recibido una educación humanista que incluía el estudio de la filosofía clásica alemana. Pero fue sin duda su mujer quien le ayudó a profundizar en cuestiones de fenomenología o de neokantismo.

Cualquiera que lea *Simetría* (Princeton, 1952) tendrá la impresión de que Weyl se interesaba por la historia del arte y la filosofía. Y que, si bien deseaba conectar ambas con la matemática y la física, solo se proponía hacerlo de una forma divulgativa. Sin embargo, la lectura de sus obras sobre los fundamentos de la mecánica cuántica o las matemáticas revela la profunda influencia que ejerció la filosofía en su pensamiento. Para obtener una visión más clara, hay que leer obras como *Filosofía de las matemáticas y de las ciencias naturales* (primera edición alemana de 1927, edición en inglés de 1949). La filosofía reluce asimismo con gran claridad en la introducción a *Espacio, tiempo y materia*.

El interés de Weyl por la filosofía ha de adscribirse, por otro lado, a los cambios asociados a la relatividad y, especialmente, a la introducción en física del concepto de espaciotiempo. La nueva teoría propició debates que inevitablemente condujeron a los científicos a la reflexión filosófica, algo que Weyl nunca abandonó. En la introducción a *Espacio, tiempo y materia* describe tal cambio como sigue:

Nuestro tiempo ha presenciado un cataclismo que se ha llevado por delante el espacio, el tiempo y la materia, hasta ahora considerados los pilares más firmes de la ciencia natural, dejando en su lugar una visión más amplia y profunda de las cosas.

En la misma introducción, Weyl utiliza la fenomenología de Husserl para explicar en clave conceptual los cambios introducidos por la relatividad de Einstein. En primer lugar, argumenta que espacio y tiempo son formas de los fenómenos cuya métrica se rige por reglas formales expresadas mediante grupos de simetría. Precisamente, la urgencia de comprender no solo de forma matemática, sino también conceptual, la estructura dinámica del espaciotiempo y su relación activa y pasiva con la materia es la razón por la cual Weyl decidió expresar en su obra la relevancia filosófica de dichos conceptos introducidos por la física. Aunque su investigación no se origine en la reflexión filosófica, Weyl deja claro que la relatividad ha desempeñado un importante papel en el desarrollo de sus ideas, y que la filosofía puede sin duda facilitar, mediante nuevas categorías filosóficas, la comprensión de esa nueva manera de representar espacio y tiempo.

La eficacia de las matemáticas

Por otro lado, en obras como *Filosofía de las matemáticas y de las ciencias naturales*, Weyl combina matemáticas, filosofía y física para comprender la misteriosa eficacia de las matemáticas a la hora de representar y predecir los fenómenos físicos. En sus *Obras completas* leemos, por ejemplo, que el fundamento de la aplicación de las matemáticas a la física queda fuera de la esfera de racionalización objetiva, y que pertenece a los fundamentos de la subjetividad:

La cuestión del fundamento y el significado último de las matemáticas permanece abierta; no sabemos en qué dirección se halla su solución final, ni siquiera si podemos esperar que exista una solución final objetiva. Puede que la «matematización» sea una actividad creativa humana, como el lenguaje o la música, de una originalidad primordial, cuyas decisiones históricas desafíen su completa racionalización objetiva.

Weyl desarrolló sus ideas sobre la relatividad y la mecánica cuántica en paralelo a sus propias ideas filosóficas, como sus reflexiones sobre el concepto de materia y subjetividad, y en particular sobre epistemología, preguntándose cómo construimos las teorías físicas mediante el lenguaje y los números, y qué tipo de conocimiento implica hablar de «un objeto físico». Su comprensión de las teorías físicas como producto de una actividad creativa y una construcción simbólica refleja la influencia de Kant y el idealismo alemán, así como del neokantismo, en particular el de Ernst Cassirer.

Weyl pensaba que nuestra capacidad para anticipar, describir y controlar los fenómenos es mayor cuanto más desarrollamos instrumentos matemáticos —como los grupos de simetría— y cuando encontramos simetrías que puedan «simbolizar» las leyes físicas. Su significado universal explica que tales instrumentos sean aplicables a la naturaleza y que puedan orientarnos en la compleja dinámica de la materia, del mismo modo que la filosofía nos puede orientar en la complejidad de nuestras vidas como producto social e histórico. IyC

PARA SABER MÁS

The reign of relativity: Philosophy in physics 1915-1925. Thomas Ryckman. Oxford University Press, 2005.

Weyl's «agens theory» of matter and the Zurich Fichte. Norman Sieroka en *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, vol. 38, págs. 84-107, 2007.

Philosophy of mathematics and natural science. Hermann Weyl. Princeton University Press, 2009.

Hermann Weyl's *Raum-Zeit-Materie* and a general introduction to his scientific work. Dirigido por Edhard Scholz. Birkhäuser, 2012.

Levels of infinity: Selected writings on mathematics and philosophy. Hermann Weyl, edición de Peter Pesic. Courier, 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

Teorías gauge de las fuerzas entre partículas elementales. Gerard 't Hooft en IyC, agosto de 1980. Reeditado para «Grandes ideas de la física», colección *Temas de IyC*, n.º 80, 2015.

Einstein, Lorentz, Eddington, Weyl y la relatividad general. José Manuel Sánchez Ron en *IyC*, noviembre de 2015.

por Steven L. Chown

Steven L. Chown es profesor de ciencias biológicas en la Universidad Monash de Melbourne, Australia, y presidente del Comité Científico para la Investigación Antártica.



La necesaria colaboración antártica

La coordinación científica es esencial para avanzar en políticas ambientales globales

El Tratado Antártico, hoy suscrito por 53 países, está consagrado a la idea de un continente sin discordias reservado para la ciencia. En 1959, las naciones se comprometieron a dejar de reclamar territorios y a utilizar el continente solo con fines pacíficos, cooperar en investigaciones científicas y compartir los resultados.

Desde entonces, las infraestructuras científicas han ido proliferando. Algunas naciones, como China, Alemania, Corea del Sur, Nueva Zelanda y Reino Unido, han construido nuevas estaciones de investigación o han modernizado las ya existentes. Australia, Noruega y Reino Unido han botado, o pronto lo harán, buques de investigación más grandes. En mayo, Australia anunció que construiría la primera pista de aterrizaje asfaltada del continente, que permitirá la llegada de grandes aviones a la Antártida oriental durante todo el año. Otros países también están mejorando su acceso aéreo.

¿Por qué todo ese interés? Comprender la región es fundamental para predecir los cambios ambientales a escala mundial, y en particular la elevación del nivel del mar y sus implicaciones para la población y la pobreza. Pero también existen consideraciones geopolíticas. Más países quieren mantener su presencia por debajo del paralelo 60º de latitud sur, especialmente a medida que el océano Antártico se vuelve más accesible para la pesca.



No obstante, pocas naciones están desarrollando una fuerza intelectual que complemente la creciente infraestructura. Deberían buscarse formas de compartir recursos de investigación y coordinar esfuerzos. Una labor difusa no proporcionará la información que precisan los dirigentes mundiales para poder actuar. Ha llegado el momento de centrarse.

El Comité Científico para la Investigación Antártica (SCAR), organismo que presido, se fundó casi al mismo tiempo que se firmó el Tratado Antártico y actúa como asesor científico para la región. De momento, ya coordina actividades que abarcan desde los estudios de depredadores marinos hasta los pronósticos meteorológicos espaciales, que permiten dar alertas sobre tormentas geomagnéticas, fundamentales para la protección de los tendidos eléctricos y los satélites.

Aunque a menudo se solicita asesoramiento al SCAR, raramente recibe la financiación necesaria para proporcionarlo. Los países que invierten millones de dólares en infraestructuras verían incrementar la rentabilidad de sus inversiones si destinaran una pequeña fracción al desarrollo de una investigación coordinada.

Las competencias del SCAR deberían ampliarse para abordar preguntas científicas cuyas respuestas pudieran servir para perfilar acuerdos globales. Una de las cuestiones fundamentales consiste en calcular cuánto tiempo el océano Antártico continuará absorbiendo carbono a medida que sus aguas se calientan y se acidifican. Otra es estimar en qué medida los cambios en las poblaciones de kril amenazarán los caladeros y alterarán los ecosistemas, donde habitan depredadores icónicos como pingüinos, focas y ballenas.

La tarea más urgente consiste en reducir la incertidumbre sobre la variación del nivel del mar. Es preciso investigar cómo las plataformas de hielo apuntalan los casquetes; la forma en que interaccionan el océano, las plataformas y la atmósfera; cómo el agua del deshielo fractura las plataformas, y cómo varían las precipitaciones de nieve sobre el continente.

Se necesita claridad en tales cuestiones para que los signatarios del Acuerdo de París mantengan su promesa de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Sin unos buenos modelos, gran parte de las labores de planificación quedará desperdiciada. De hecho, sin un conocimiento más profundo de la Antártida, las poblaciones humanas próximas a las costas de todo el planeta no sabrán cómo adaptarse a un nivel del mar más elevado y unas marejadas ciclónicas más frecuentes. Adquirir claridad requerirá coordinarse y compartir infraestructuras, lo que podría materializarse en forma de expediciones de investigación conjuntas para tomar muestras de sedimentos y extraer testigos de hielo, explorar el terreno situado debajo de las plataformas con vehículos autónomos y desarrollar modelos para estimar mejor los futuros cambios.

El SCAR tiene larga experiencia en facilitar colaboraciones fructíferas, como las que llevaron a descubrir el agujero de la capa de ozono o a esclarecer la importancia de las redes tróficas en los ecosistemas antárticos. Además, cuenta con otra competencia particular que, de hecho, suscitó mi interés por la organización: asesora a los firmantes del Tratado Antártico, y sus delegaciones están en posición de influir en decisiones que afectan a la región. También puede asesorar a otros organismos mundiales, como el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y el Convenio sobre la Diversidad Biológica.

El SCAR está dispuesto a coordinar investigaciones con eficacia y transmitir los hallazgos a los organismos que mejor pueden actuar en consecuencia. Las partes firmantes del tratado deberían aprovechar esta oportunidad única para apoyar una labor científica que podría reportar mejores decisiones para el planeta. IyC

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 558, págs. 163, 2018. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2018

Con la colaboración de nature

por Pere Castells

Pere Castells, experto en ciencia y cocina, es colaborador del proyecto Gastrocultura Mediterránea.



La olla a presión

Poco utilizada en los últimos años, el veterano instrumento goza de un gran potencial

La tecnología en la cocina profesional —y, por extensión, en la doméstica— quedó patente en el siglo xx con la aparición de trituradoras, montadoras, exprimidoras, tostadoras, licuadoras y microondas. Todo pensado para facilitar las labores culinarias con un común denominador: mejorar la eficiencia. En este proceso, la disminución del tiempo de cocción ha sido un factor clave. La olla a presión cumple ese objetivo. Al someter los alimentos a una presión superior a la atmosférica debido a la acumulación de vapor, las temperaturas en el interior son también mayores, de entre 115 y 120 grados Celsius. Eso cambia las condiciones de cocción y acelera el proceso.

Si hacemos un poco de historia, veremos como precedentes las investigaciones que en 1681 llevó a cabo el físico Denis Papin. En su libro *A new digester or engine for softning bones*, Papin describía un aparato para recuperar los alimentos que se desechaban. Su idea era evitar el desperdicio de comida para solucionar el hambre en el mundo. Aunque pecaba de optimista, su planteamiento de una olla cerrada podría entenderse como el germen de la olla a presión.

La idea quedó más o menos olvidada hasta que, en 1919, José Alix Martínez patentó la primera olla a presión de uso doméstico, a la que llamó «olla exprés», nombre por el que todavía se la conoce. El inventor inició también su comercialización, para lo que confeccionó una colección de recetas que facilitaban su uso. Posteriormente cedió la patente a Camilo Bellvís Calatayud, tras lo cual el instrumento pasó a denominarse «olla Bellvís», o CBC, por sus iniciales. Fue presentada en la Exposición Universal de Bruselas de 1924, donde recibió la medalla de honor. Pero su gran expansión se produjo cuando Alfred Vischler introdujo pequeñas variaciones y presentó su Flex-Seal Speed Cooker en la Exposición Universal de Nueva York de 1939.

La olla a presión revolucionó la cocción doméstica de la segunda mitad del siglo xx al aportar rapidez y efectividad, y se adaptó a la perfección a todos los ámbitos, incluido el profesional. A partir de los años ochenta, sin embargo, sus ventas comenzaron a resentirse. En ello han intervenido varios factores: desde algunos accidentes domésticos y la irrupción del microondas, la Thermomix y otros aparatos, hasta el convencimiento de que al cocer a temperaturas elevadas se perdían nutrientes. Todo ello, así como la irrupción a nivel profesional de la cocina a baja temperatura llamada «cocina al vacío», ha ralentizado su evolución. Además, cierta noción de «poco glamur», de instrumento del pasado y otras connotaciones acabaron por desterrarla de las cocinas modernas.

Respecto a la supuesta pérdida de nutrientes, diversos trabajos han demostrado que tal fenómeno no se produce. Un estudio publicado en 2007 en *The Journal of Food Science* reveló que el brócoli cocido a presión preservaba el 90 por ciento de su vitamina C, en contraste con la cocción al vapor (78 por cierto) y la ebullición (66 por ciento). Otros artículos han apuntado en la misma dirección y han indicado que, a la hora de preservar nutrientes, reviste mayor importancia la disminución del tiempo que la temperatura.

Hoy la gastronomía ha vuelto a insistir en las bondades de la olla a presión. Un ejemplo ha sido el del cocinero Ricard Camarena, que en 2015 publicó *Caldos: El código del sabor* (Montagud Editores), muchas de cuyas elaboraciones se basan en la olla exprés. Camarena ha apostado por un modelo eléctrico que le permite un mayor control del proceso. Tras investigar durante 15 años, ha llegado a la conclusión de que la olla a presión le permite concentrar aromas sin añadir agua.

A título de ejemplo, para el caldo de mejillones usa, además de los moluscos, ajo seco morado, laurel, vino blanco, pimienta negra, perejil y limón. Pone todos



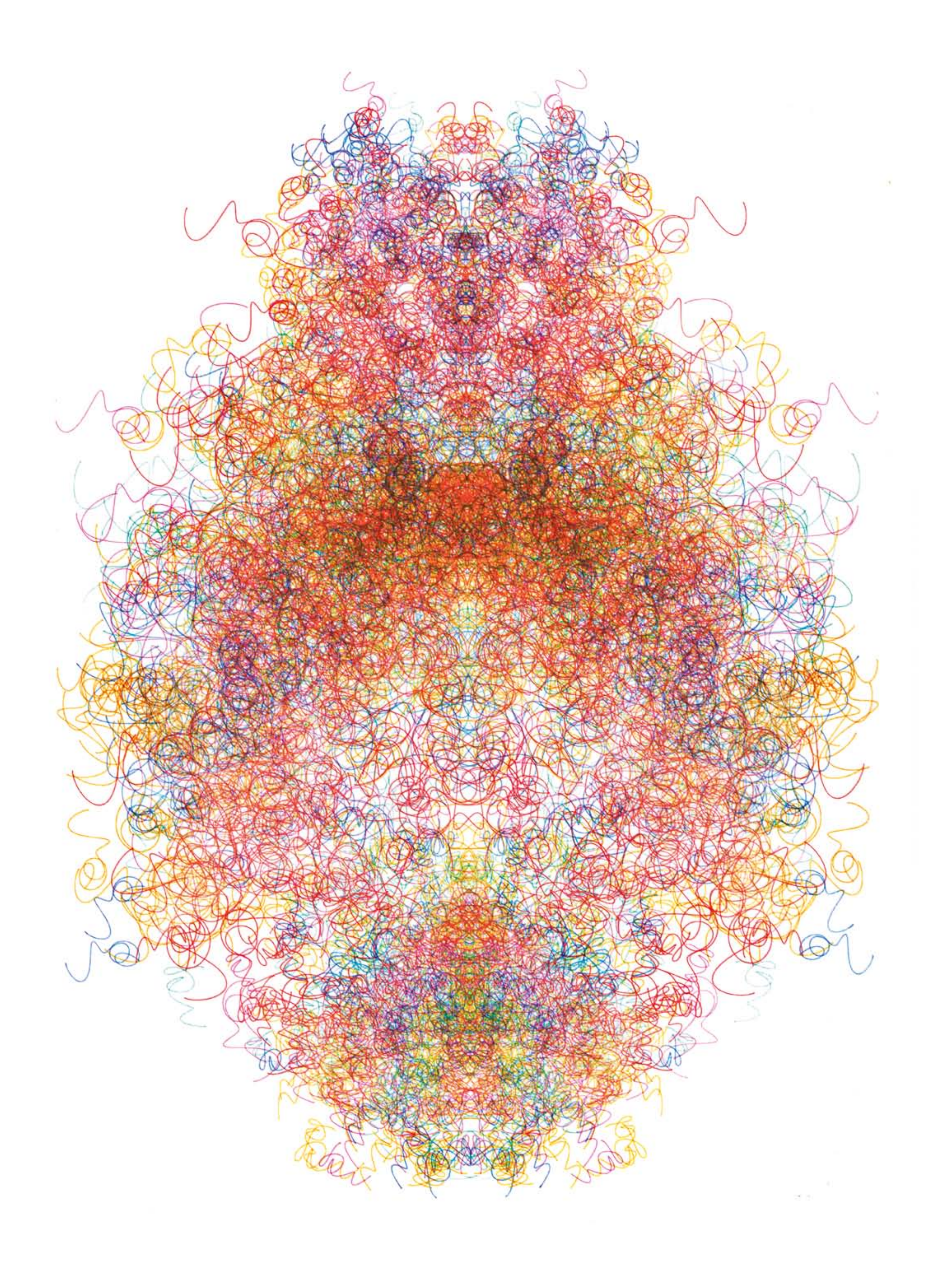
CALDO DE MEJILLONES elaborado en una olla exprés.

RICARD CARMENA

los productos en la olla exprés y suministra calor hasta que comienza a salir vapor. Lo deja reposar durante una hora, lo cuela y lo pasa de nuevo por un colador de tela, para que el «caldo» quede totalmente clarificado. Camarena ha revolucionado una de las bases de la cocina reduciendo los tiempos de cocción, eliminando procesos como la clarificación con huevo y logrando caldos distintos, en contraste con la tendencia de bajas temperaturas que impera en la alta cocina contemporánea.

Ello se ha unido a la defensa esgrimida por Nathan Myhrvold en la enciclopedia *Modernist cuisine*. Myhrvold argumenta que, en ese ambiente presurizado, los arroces se cocinan más rápido, los caldos ganan sabor y los azúcares de los alimentos caramelizan con más facilidad. A la vista de estos argumentos, cabe pensar que la olla exprés tal vez recupere su protagonismo.

La dificultad sigue siendo reintroducirla en un entorno en el que otros muchos aparatos compiten por un lugar en nuestras cocinas. Probablemente, la solución pase por nuevos diseños de menor tamaño y mejor adaptados a las necesidades actuales. Por último, se necesitan campañas informativas que subrayen el ahorro energético, estimado en un 50 por ciento con respecto a las cocciones tradicionales, los sabores más intensos y, sobre todo, el tiempo reducido de cocción. Motivos más que suficientes para recuperar este aparato que causó furor en las cocinas de nuestros abuelos.





Stephen Ornes es autor del libro *Math art: Truth, beauty, and equations* (Sterling Publishing), de próxima aparición.

Arte con números

Las imágenes y esculturas inspiradas en las matemáticas realzan la profunda belleza de esta disciplina

Stephen Ornes

Máquina universal de Turing manchesteriana miniada n.º 23 (1998)

Roman Verostko

Verostko se formó como artista en la década de 1940. Fue monje, colgó los hábitos, se casó, destripó ordenadores y aprendió BASIC. Es un pionero del arte algorítmico, que genera elementos visuales mediante programas informáticos, y usa los algoritmos para guiar el brazo mecánico de un trazador de gráficos.

Creó esta pieza en 1998 tras leer en el libro de Roger Penrose *La nueva mente del emperador* sobre la máquina universal de Turing (MUT). Esta máquina abstracta, concebida por Alan Turing, emulaba las funciones de cada máquina de Turing especializada, por lo que en teoría podría calcular todo lo que fuese calculable. Cuando Verostko supo de su existencia, la imaginó como una suerte de texto fundacional de nuestro tiempo, una creación que cambiaría la cultura para siempre. Durante sus estudios religiosos le fascinaron los manuscritos miniados, textos medievales con iluminaciones en oro o plata. Verostko creía que la MUT era una obra contemporánea que merecía ser iluminada.

El «texto» de la máquina de Turing (*arriba*) es un código binario: una larga cadena de ceros y unos, el lenguaje de los ordenadores. Para crear iluminaciones que evocaran el trabajo de los copistas medievales, Verostko ideó figuras abstractas, como la que abre este artículo, generada con un trazador de gráficos.

A MENUDO SENTIMOS UNA FRÍA VENERACIÓN por las matemáticas y sus verdades eternas, como que el conjunto de números primos siempre será infinito o que los dígitos de pi nunca terminarán.

Pero bajo tanta certeza subyace un atractivo sublime. Una demostración o una ecuación pueden causar un efecto estético. La teoría de grupos analiza las reglas de las rotaciones o las reflexiones; transformaciones que, visualmente, exhiben simetrías de una profunda belleza, como el patrón radial de un copo de nieve.

Para algunos matemáticos y artistas, la dicotomía entre matemáticas y arte es falsa. Han elegido no elegir. Plantean preguntas en el lenguaje de los números y la teoría de grupos, y hallan respuestas en metales, plásticos, maderas o en la pantalla de un ordenador. Tejen, bosquejan, construyen. Intercambian ideas cada año en congresos internacionales sobre matemáticas y arte, como el Bridges, o coinciden en el Gathering 4 Gardner, una reunión bienal en honor a Martin Gardner, antiguo autor de la sección Juegos Matemáticos de esta revista.

El interés por el arte matemático parece estar floreciendo. El fenómeno se remonta a finales del siglo XX, pero hoy los artistas disponen de un espectro más amplio de musas matemáticas y se benefician de las herramientas modernas. A continuación mostramos algunas de sus obras más asombrosas.



Superficie de Seifert de un nudo de Borromeo (2008)

Bathsheba Grossman

Grossman lleva más de una década usando la impresión en 3D para forjar esculturas matemáticas de metal. Se deleita con las simetrías, las imposibilidades y la división del espacio. Aquí, los tres anillos exteriores no se tocan; sin embargo, se entrelazan inextricablemente. Si se elimina uno de ellos, pueden separarse los otros dos. Se trata de una antigua figura: el nudo de Borromeo, que hoy forma parte del logo la Unión Matemática Internacional.

Los anillos de Borromeo pertenecen a una familia matemática de formas enlazadas, caracterizadas por tres curvas cerradas sin que haya dos que estén físicamente conectadas. Sus interacciones son de particular interés en teoría de nudos. La superficie delimitada por los anillos de Borromeo se denomina superficie de Seifert.

La escultura de Grossman es en parte teoría de nudos y en parte un rompecabezas. Para destacar los acusados desniveles de la superficie, usó una textura perforada que juega con la luz y que realza su curiosa topografía.

Budabrot (1993)

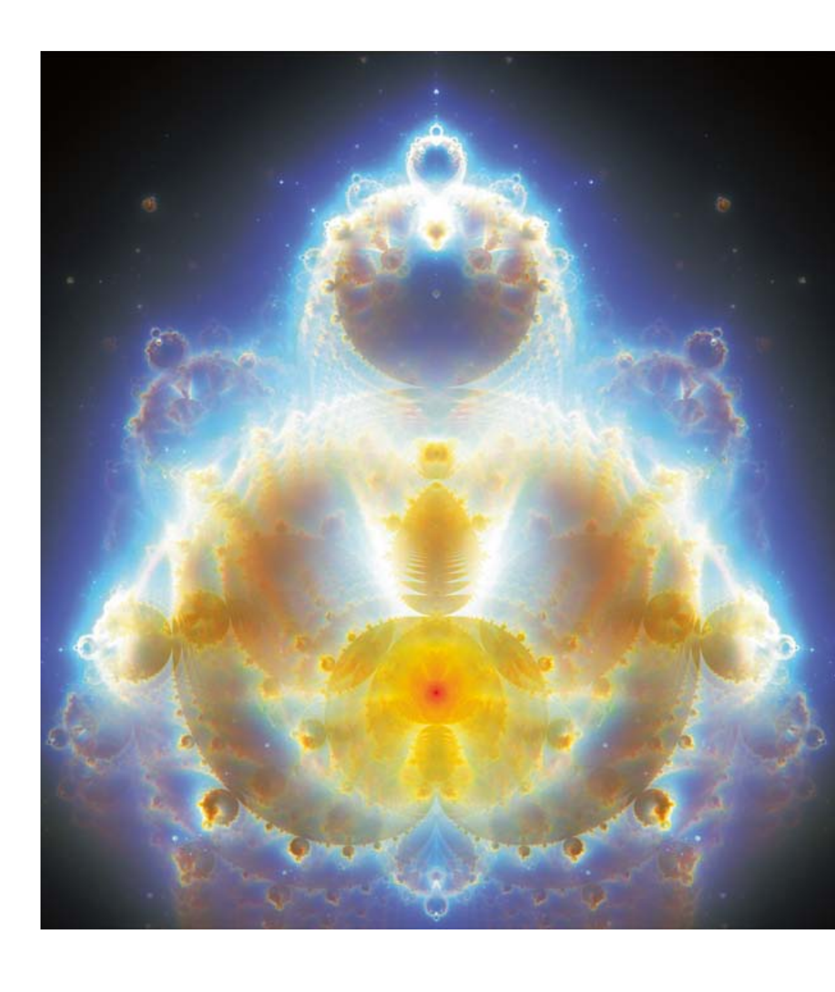
Melinda Green

En el siglo XX, un patrón fractal, el conjunto de Mandelbrot, tomó al asalto los reinos de las matemáticas y del arte. Su creador, Benoit B. Mandelbrot, convirtió los fractales en un campo digno de investigación. Su libro *La geometría fractal de la naturaleza*, de 1982, sigue siendo un clásico.

Para construirlo, se comienza con un punto en el plano complejo (un plano bidimensional) que sirve como valor inicial para una determinada ecuación. El valor obtenido se introduce a su vez en la ecuación y el proceso se repite. Si los resultados no crecen demasiado (si la iteración «no diverge», en lenguaje técnico), el punto inicial pertenecerá al conjunto.

Las representaciones de tales conjuntos muestran formas características que se repiten cuando se las amplía o reduce. Hasta la década de 1990, el conjunto de Mandelbrot presentaba una apariencia estándar: una especie de escarabajo en cuyos bordes se hallaban otros más pequeños, y en los de estos, otros aún menores.

A Green, programadora informática, no le gustaba ese aspecto, por lo que creó un algoritmo que mostraba con mayor detalle la manera en que ciertos puntos iban «saltando» por el plano. El resultado fue fantasmagórico: una imagen muy convincente de Buda, tras lo cual Green revisó el programa para acentuar los colores. Muchos matemáticos comparan las abstracciones matemáticas con las experiencias espirituales; el *Budabrot* de Green tiende ese puente de manera explícita.





Aurora australis (2010)

Carlo H. Séquin

En el arte matemático, a Séquin, científico computacional de la Universidad de California en Berkeley, se le conoce por cientos de obras que dan cuerpo a ideas sobre superficies, giros y dimensiones. Ha creado un auténtico zoo de objetos de madera, metal y plástico.

Para esta pieza en concreto se inspiró en las luces celestes del hemisferio sur: la aurora austral. La banda sinuosa de la escultura evoca las inflexiones de la luz. Se alabea, se aplana, se conecta consigo misma. Si recorremos el serpenteante camino con el dedo índice, pasaremos por todas las secciones y acabaremos en el reverso del punto de partida sin que el dedo se haya levantado nunca de la escultura. La cara interna es también la externa. Se trata de una cinta de Möbius, la superficie no orientable más simple conocida. Eso significa que no se le pueden aplicar términos como *delante*, *detrás* o *del revés*.

Según Séquin, los elementos visuales de este tipo no solo resultan cautivadores, sino que brindan acceso a conceptos matemáticos difíciles. «Es un modo de conseguir que la gente que odia las matemáticas cambie de opinión», asegura. «Es una manera de ver que van mucho más allá de algo que hay que aprender a fuerza de codos.»



Plano hiperbólico/Pseudoesfera (2005)

Daina Taimina

Las aventuras de Taimina en el mundo de la artesanía geométrica se iniciaron en la década de 1990, cuando impartía clases de geometría hiperbólica en la Universidad Cornell. En geometría euclídea, si tenemos una recta y un punto que no pertenece a ella, solo podremos trazar una única recta que pase por este y que sea paralela a la primera. En una geometría hiperbólica, sin embargo, existen múltiples rectas que pasan a través del punto en cuestión y no se cruzan con la primera. Un plano hiperbólico posee una curvatura negativa constante (la superficie de una esfera tiene curvatura positiva; las de curvatura negativa recuerdan a una silla de montar) y, como consecuencia, los ángulos de un triángulo suman menos de 180 grados. Se trata del peculiar tipo de curvatura que muestran las florituras en los bordes de una hoja de col rizada.

Taimina quería crear modelos táctiles con los que sus alumnos pudieran apreciar la curvatura. El croché, al que había sido aficionada casi toda su vida, se ajustaba bien a su propósito. Con hilo y una aguja de ganchillo creó una superficie hiperbólica aplicando una sencilla regla: aumentar el número de puntadas de manera exponencial. La que se muestra en esta página es una pseudoesfera, que tiene curvatura negativa en todas partes.

Taimina ha construido docenas de modelos polícromos (el mayor pesa unos 8 kilos) y puede reivindicar como suya la invención del «croché hiperbólico». Su método consta de un único paso básico. «Es muy fácil», asegura. «Mantén constante la curvatura.»

EN ESTA PÁGINA: DISEÑO, CROCHÉ Y FOTOGRAFÍA DE DAINA TAIMINA; EN LA PÁGINA OPUESTA (*abajo*): INSPIRADO EN UN BOCETO DE M. C. ESCHER

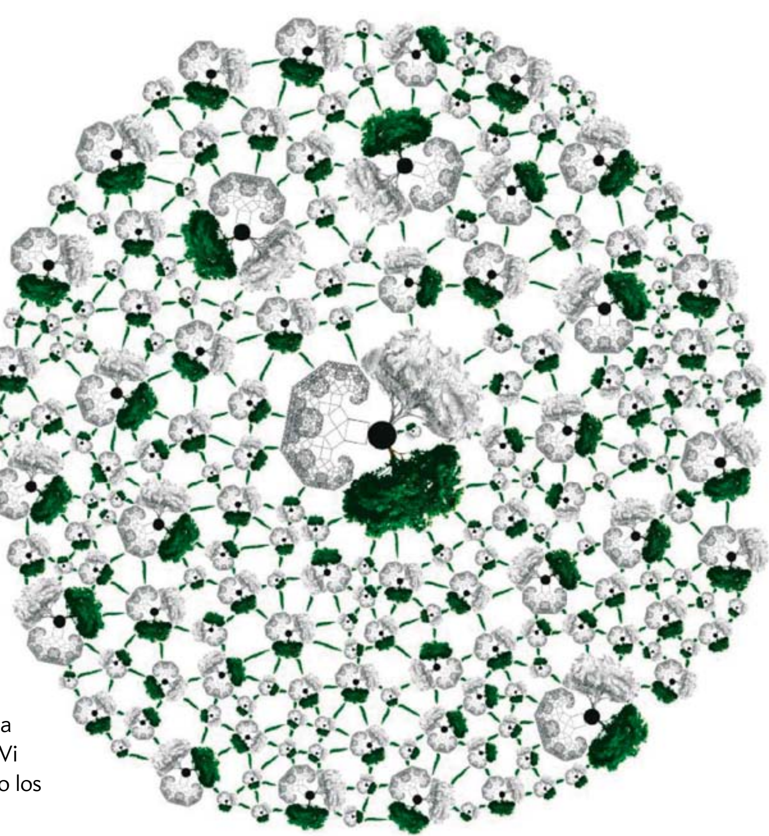
Árbol atómico (2002)

John Sims

John Sims encuentra la inspiración en diversos conceptos matemáticos. La imagen que se ve aquí representa un árbol que crece como un fractal, como un patrón autosimilar, idéntico a sí mismo a cualquier escala, tanto si se aumenta el detalle como si la imagen se mira desde más lejos. Tales patrones aparecen también en el brócoli y en las cordilleras montañosas, y se han usado para estudiar todo tipo de fenómenos, desde la estructura del cosmos a gran escala hasta el vuelo de las aves.

Un árbol real, otro dibujado y un fractal arbóreo sirven aquí de bloque estructural que se repite con distintos tamaños y que se interconecta para producir una red mayor. «Alude a la intersección de las matemáticas, el arte y la naturaleza», señala Sims.

Sims exhibió esta pieza por primera vez en la exposición MathArt/ArtMath de 2002, de la que fue coordinador, en la Escuela Ringling de Arte y Diseño, en Florida. Además, ha elaborado multitud de objetos (colchas, vestidos...) inspirados en la secuencia de dígitos de pi. En el año 2015, junto con su colega Vi Hart, compuso un *Himno del día de pi*, en el que recitaban a dúo los dígitos de pi sobre una pegadiza base de bajo y batería.



Escarabajos (2018)

Bjarne Jespersen





Jespersen se autodenomina «tallador mágico de madera». Este artista danés aspira a generar incredulidad: quiere que la gente vea y toque sus creaciones de madera, que juegue con ellas y, aun así, no se las crea. «Tengo más de mago que de matemático o de artista», afirma.

Si sostenemos en las manos esta bola, percibiremos enseguida que cada uno de sus escarabajos se mueve con independencia del resto, a pesar de que se encuentran entrelazados de tal manera que resulta imposible separarlos sin romper algo. La bola está tallada a partir de un único bloque de haya.

Jespersen tiene influencias del artista holandés M.C. Escher, cuya obra exhibe un marcado espíritu matemático. Escher popularizó las teselaciones: figuras geométricas que, encajadas unas con otras, pueden recubrir por completo el plano. Los matemáticos llevan largo tiempo investigando sus propiedades, tanto en dos dimensiones como en más (Escher se inspiró en los mosaicos islámicos; en concreto, en los que decoran las paredes de la Alhambra). Los *Escarabajos* de Jespersen tienen a estos insectos como unidad básica de teselación.

PARA SABER MÁS

Mathematics and art: A cultural history. Lynn Gamwell. Princeton University Press, 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Arte y matemáticas. Martin Gardner en *IyC*, marzo de 1978. Reeditado para *El universo matemático de M. Gardner*, colección *Temas de IyC* n.º 77, 2014.

Michael R. Rampino es profesor de biología y estudios ambientales de la Universidad de Nueva York y asesor del Instituto Goddard de Estudios Espaciales de la NASA.



GEOLOGÍA

Las leyes de Lyell, a examen

Cada vez más pruebas indican que la historia de la Tierra ha sido moldeada por catástrofes periódicas. El hallazgo cuestiona uno de los dogmas más arraigados de la geología

Michael R. Rampino

[Los principios del razonamiento en geología] son [...] que nunca, desde los tiempos más antiguos a los que podemos remontarnos hasta el presente, han actuado causas distintas a las que operan en la actualidad; y que estas no han actuado nunca con grados de energía distintos de los que ejercen hoy.

Charles Lyell en una carta a Roderick Murchison, 1829

Las ideas centrales de la geología moderna parten de la obra del geólogo británico Charles Lyell *Principios de geología: Un intento de explicar los cambios ocurridos en el pasado sobre la superficie de la Tierra haciendo referencia a las causas que operan en la actualidad.* Publicada en tres volúmenes entre 1830 y 1833, esta obra magna gozó de buenas ventas y reportó grandes beneficios a su autor. Su título de caballero, más tarde seguido por el de barón, contribuyó a su reputación como el geólogo más influyente de mediados del siglo xix. La próspera familia de Lyell, su estrecha amistad con Charles Darwin y su prestigiosa posición en el King's College londinense afianzaron su notoriedad.

Principios de geología exponía tres ideas fundamentales que definirían la geología durante largo tiempo y que, aún hoy, ejercen una fuerte influencia en la disciplina. Lyell describía una Tierra modelada por cambios leves, lentos y causados por las mismas fuerzas que vemos operar en el mundo actual. Descartaba las ideas catastrofistas de sus contemporáneos y ridiculizaba su necesidad de recurrir a cataclismos procedentes del cielo para explicar los principales eventos geológicos y biológicos acontecidos a lo largo de la historia terrestre.

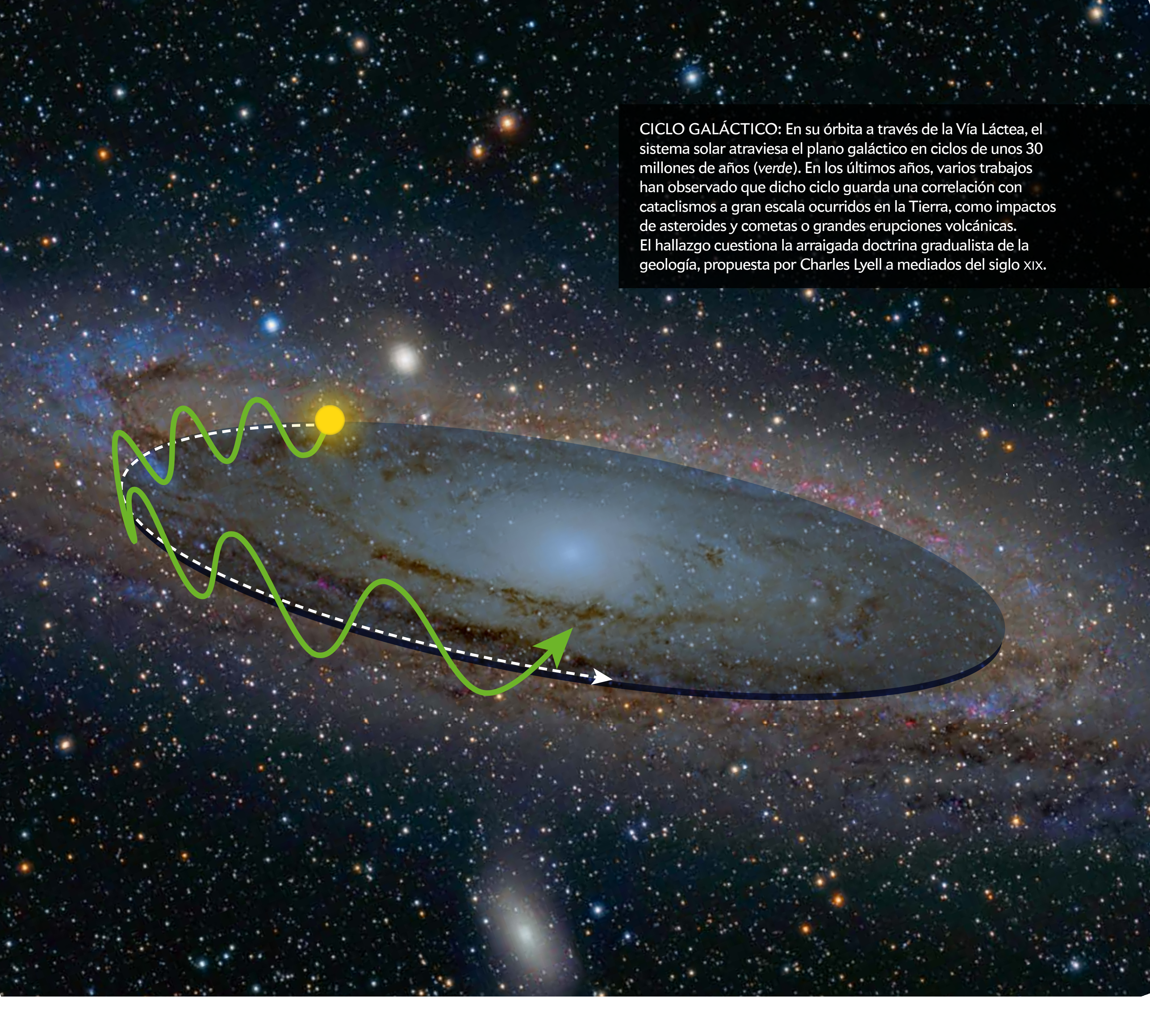
Sin embargo, un amplio y creciente conjunto de datos muestra que Lyell estaba fundamentalmente equivocado. En los años ochenta del pasado siglo, el descubrimiento de que los dinosaurios se habían extinguido como consecuencia de un cataclismo puso en entredicho el planteamiento gradualista. Desde entonces, los geólogos han comprendido que las catástrofes causaron otras extinciones en masa y varios de los cambios abruptos de gran envergadura que se observan en el registro geológico. Lo más inesperado de todo, sin embargo, ha sido el descubrimiento de que dichos eventos catastróficos parecen haber seguido un patrón regular, en ciclos que se repiten. Tales hallazgos plantean un modo completamente nuevo de entender la historia geológica y biológica de la Tierra.

EN SÍNTESIS

Desde el siglo xix, la geología se ha basado en el supuesto de que la historia de la Tierra obedece a cambios graduales, de origen terrestre y sin repeticiones cíclicas.

En los últimos años, sin embargo, se ha constatado el importante efecto que los impactos extraterrestres y el vulcanismo catastrófico han ejercido sobre las extinciones en masa.

Tales cataclismos parecen ocurrir en ciclos de entre 26 y 30 millones de años. Dicho período guarda una estrecha relación con el movimiento del sistema solar a través de la galaxia.



CICLO GALÁCTICO: En su órbita a través de la Vía Láctea, el sistema solar atraviesa el plano galáctico en ciclos de unos 30 millones de años (*verde*). En los últimos años, varios trabajos han observado que dicho ciclo guarda una correlación con cataclismos a gran escala ocurridos en la Tierra, como impactos de asteroides y cometas o grandes erupciones volcánicas. El hallazgo cuestiona la arraigada doctrina gradualista de la geología, propuesta por Charles Lyell a mediados del siglo XIX.

LAS LEYES DE LYELL

Lyell era un abogado escocés, pero su financiación privada le permitió cultivar su pasión por la geología. Pasó su luna de miel entre las rocas de Suiza e Italia, y más adelante publicó dos populares guías de viaje geológicas basadas en sus visitas a Norteamérica. Gracias a sus viajes por el mundo y a unas astutas observaciones geológicas, Lyell se posicionó como una autoridad en la disciplina.

Las experiencias de Lyell le permitieron consolidar sus opiniones ante las teorías que trataban de explicar la formación de la Tierra. La más inaceptable para él era la relacionada con los cataclismos. Lyell explicó sus objeciones en una carta escrita en 1830 donde sostenía que pueden producirse cambios climáticos significativos «sin ayuda de un cometa o cambios astronómicos». La mofa iba dirigida a las reflexiones de académicos como William Whiston, profesor lucasiano de matemáticas de la Universidad de Cambridge, quien atribuía algunos eventos del registro geológico a colisiones con cometas.

En 1696, Whiston publicó *Una nueva teoría de la Tierra*, donde proponía una cosmogonía según la cual nuestro planeta se habría originado cuando un cometa se transformó en un mundo ideal, con una órbita circular y sin inclinación ni rotación. Más adelante, según Whiston, Dios envió otro cometa hacia la Tierra y su colisión modificó la órbita del planeta, que además comenzó a rotar. El gran impacto fracturó la corteza terrestre y liberó las aguas de la inundación bíblica, mientras que los vapores de la cola del cometa se condensaron en forma de lluvias torrenciales. Los cometas, por tanto, dejaron de ser presagios de calamidades locales pertenecientes a antiguas supersticiones para convertirse en causas naturales de cataclismos globales. Incluso Edmund Halley, el astrónomo que determinó la órbita del cometa homónimo, e Isaac Newton conjeturaban que los períodos geológicos, históricos y sagrados estaban salpicados de catástrofes relacionadas con cometas.

A Lyell le preocupaba que semejantes ideas llevasen la geología al terreno de la especulación salvaje. En su lugar, siguió los

pasos de James Hutton, científico escocés de finales del siglo XVIII y uno de los primeros en entender el significado de «tiempo profundo»: comprender que se requerían largos períodos de tiempo para explicar los grandes cambios geológicos a partir de las lentas fuerzas de erosión, levantamiento y deformación de las rocas. Lyell creía que todo factor que influyera en la formación de estructuras geológicas y en la historia de la vida tenía que ser inherente a la Tierra. Así, trató de que la geología se mantuviera centrada en procesos locales que pudieran ser estudiados, verificados y comprendidos. En su libro describía un mundo que cambiaba a una velocidad constante de acuerdo con tres simples reglas.

En primer lugar, el cambio geológico responde a procesos graduales y lentos, también observados en la actualidad, que actúan durante largos períodos de tiempo. Lyell se burlaba de la idea de que en la historia de la Tierra se hubieran producido cambios catastróficos, y arremetía contra los fervorosos catastrofistas geológicos que hablaban de «cataclismos generales y diluvios sucesivos, la alternancia de períodos de reposo y desorden, el enfriamiento del globo, la aniquilación repentina de razas enteras de animales y plantas».

En segundo lugar, las fuerzas geológicas son intrínsecas a la Tierra. No se debe recurrir a cometas u otros cuerpos extraterrestres para explicar la historia geológica. Para Lyell, el catastrofismo astronómico era una distracción que inducía a «perder el tiempo con especulaciones sobre la capacidad de los cometas para hacer llegar las aguas del océano a la superficie; sobre la condensación de los vapores de sus colas en forma de agua y otras cuestiones igualmente edificantes».

En tercer lugar, el registro geológico no contiene pautas repetitivas y regulares influidas por ciclos celestes, una idea que para Lyell tenía connotaciones de predestinación. ¿Podía permitir Dios que las estrellas influyeran en su ordenado mundo? Lyell ridiculizó las teorías propuestas por astrónomos ingenuos que comparaban el curso de los eventos acontecidos en nuestro planeta con ciclos astronómicos. De ellos decía: «No solo consideraban que todas las cuestiones sublunares se encontraban bajo la influencia de cuerpos celestes, sino que enseñaban que, en la Tierra, al igual que en los cielos, se repetían una y otra vez fenómenos idénticos en perpetua vicisitud».

Otros geólogos ya habían abrazado ideas gradualistas similares antes que Lyell. Pero estas quedaron ampliadas y codificadas en sus *Principios*, con lo que más tarde se transmitieron a través de generaciones de libros de texto. Puesto que Lyell tenía formación en derecho, *Principios de geología* podría considerarse como un texto legal. Comienza con una particular perspectiva teológica y filosófica del registro geológico, y está estructurado como una larga argumentación, con ejemplos específicamente seleccionados para apoyar sus tesis. Como concisa argumentación a priori, sus conclusiones parecen irrefutables. Como texto legal, *Principios de geología* resultó ser extremadamente efectivo en el tribunal de la opinión científica. Y la doctrina que proponía, hoy conocida como «uniformismo», se considera la gran contribución de Lyell a las ciencias geológicas. El uniformismo influyó a Charles Darwin para considerar que las formas de vida en la Tierra también habían cambiado a partir de procesos lentos y continuos. No obstante, algunos de los primeros disidentes permanecieron firmes.

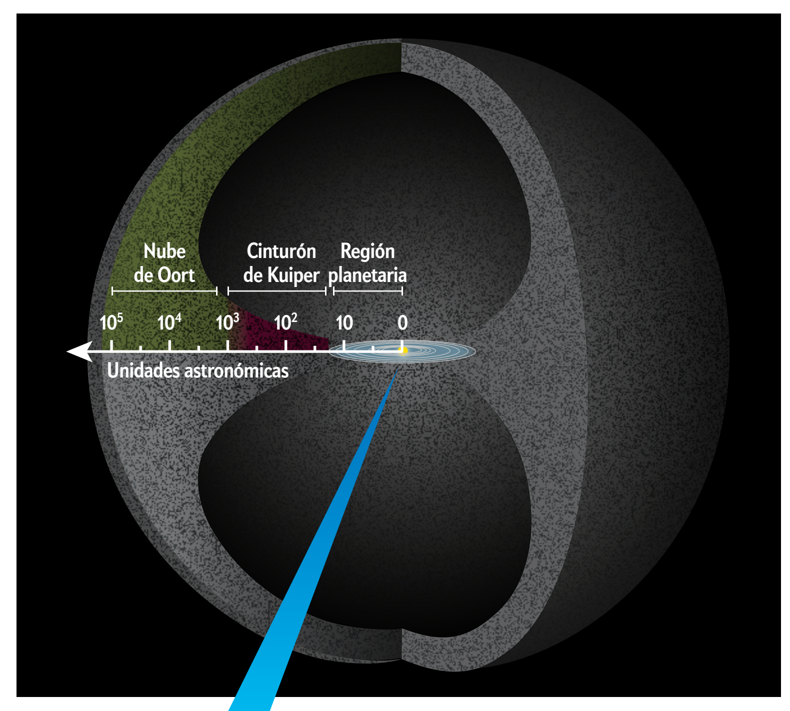


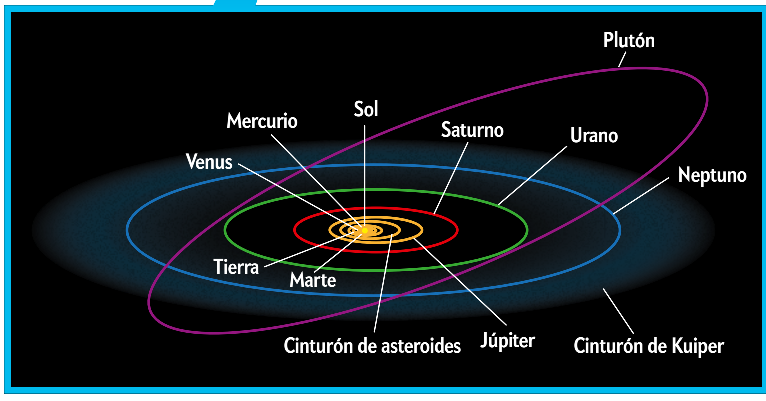


BIBLIOTECA LINDA HALL DE CIENCIA, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA (*Principios de geología*); REAL SOCIEDAD DE LONDRES (*Charles Lyell*)

OBRA INFLUYENTE: Charles Lyell (*derecha*) publicó sus *Principios de geología* en tres volúmenes entre 1830 y 1833. En la portada del primero (*izquierda*) aparecía el Templo de Serapis en Pozzuoli, una ciudad costera italiana. En los tres pilares, por aquel entonces en tierra, se apreciaba una banda de agujeros horadados por moluscos que habían vivido en las columnas cuando, en algún momento de la historia, estas habían quedado sumergidas. Que las columnas se hubieran hundido en el mar y hubieran emergido sin desmoronarse desconcertó a los geólogos, hasta que se descubrió que unos lentos movimientos de magma bajo la corteza desplazaban el suelo verticalmente y, con él, las columnas. Para Lyell, ello constituía una prueba visible de que los procesos lentos y graduales pueden modificar el paisaje.

ENTORNO PLANETARIO: La nube de Oort (*arriba*) comprende un enjambre de cuerpos helados que orbitan mucho más allá de Neptuno. Una hipótesis reciente postula que, cuando el sistema solar atraviesa el plano central de la galaxia, la nube de Oort se desestabiliza y envía cometas hacia los planetas (*abajo*) en ciclos que oscilan entre 26 y 30 millones de años.





A comienzos del siglo XIX, el barón Georges Cuvier defendió la versión inicial de una teoría catastrofista del cambio geológico. Cuvier era un brillante anatomista comparativo. A menudo llamado «el padre de la paleontología de vertebrados», estudió junto con sus colaboradores los fósiles y los estratos rocosos de la cuenca de París, y presentó pruebas empíricas de cambios episódicos, catastróficos y devastadores. Halló que el registro geológico mostraba huellas de largos períodos de calma alternados con fases breves de desapariciones repentinas de especies fósiles, hoy conocidas como extinciones en masa. Cuvier atribuía esas extinciones a fuerzas desconocidas relacionadas con cataclismos. «Buscaremos en vano, entre las distintas fuerzas que todavía operan en la superficie de nuestra Tierra, causas capaces de producir esas revoluciones y catástrofes de las que la corteza externa exhibe tantas huellas», argumentaba.

La respuesta de Lyell a los hallazgos de Cuvier y la escuela catastrofista francesa fue que los aparentes cataclismos y repentinos cambios geológicos y biológicos procedían de un registro geológico imperfecto, semejante a un libro al que, pese a poder leerse, le faltaran muchas páginas debido a la erosión o a la falta de sedimentación. Por tanto, de acuerdo con Lyell, no podemos confiar en nuestras propias observaciones, especialmente cuando cuestionan el «plan de la naturaleza» que a priori somos capaces de deducir.

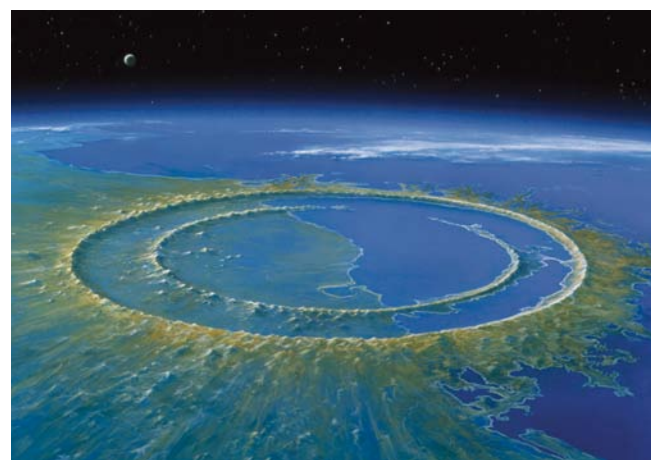
Lyell convenció a sus lectores de que estaba siguiendo el único camino razonable y, finalmente, el gradualismo se impuso. Un Lyell triunfante declaró: «Se rechazan todas las teorías que impliquen la suposición de catástrofes repentinas y violentas y revoluciones de toda la Tierra y sus habitantes». El lema de la geología se convirtió en «el presente es la clave del pasado»; en otras palabras, deben estudiarse los procesos geológicos que operan hoy y extender esos mismos procesos lentos a lo largo de vastos períodos de tiempo geológico para poder explicar los orígenes de las estructuras del planeta.

No es de extrañar que el gradualismo haya sido la doctrina aceptada en geología en los últimos dos siglos. En la actualidad pueden observarse procesos graduales y, para muchos geólogos, lo lógico era asumir que las lagunas de un registro rocoso incompleto pudieran completarse a partir de esos mismos procesos familiares. Ni siquiera el cambio revolucionario que experimentó la geología al aceptar la tectónica de placas hace 50 años trastocó el predominio de las ideas de Lyell. Es más, la imagen que evoca la tectónica de placas, con una Tierra similar a una máquina, representa el modelo perfecto de un sistema lento, ordenado e impulsado por fuerzas internas invisibles.

Sin embargo, es evidente que Hutton y Lyell no comprendían en su totalidad el significado del «tiempo profundo» que defendían. De haberlo hecho, nunca habrían presentado la historia de la Tierra como dependiente de procesos graduales. Existe una amplia variedad de eventos que tienden a obedecer una particular relación inversa entre frecuencia y magnitud: los eventos de baja magnitud tienden a ocurrir con mucha mayor frecuencia que los de magnitud elevada. Por ejemplo, en el caso de la sismicidad, los terremotos poco intensos son comunes, los de magnitud superior suceden con menos frecuencia y los más devastadores son, con diferencia, los menos habituales. Sin embargo, son estos últimos los que producen los cambios geológicos más fáciles de observar. En cuanto al impacto de meteoritos, las colisiones entre objetos en el propio cinturón de asteroides tienden a producir numerosos fragmentos pequeños, pero menos de gran tamaño. Respecto a las erupciones volcánicas, los eventos de mayores dimensiones, las erupciones masivas de lava conocidas como «erupciones de basaltos de inundación», tienen lugar en episodios poco frecuentes, en los que enormes plumas ascendentes de roca caliente procedente del interior de la Tierra alcanzan la corteza terrestre.

Ese patrón predecible implica que cualquier estudio relacionado con la Tierra que incluya la noción de tiempo profundo





EVENTO CATASTRÓFICO: El cráter Chicxulub (*arriba, representación artística*), en México, fue identificado en 1991. Su descubrimiento apoyó la hipótesis de que fue el impacto de un asteroide o cometa lo que acabó con los dinosaurios hace 66 millones de años. Con más de 180 kilómetros de diámetro, el cráter está circundado por una serie de dolinas, o cenotes. Los materiales expulsados en el impacto inmediato pueden hallarse en un radio de cientos de kilómetros desde el centro (*izquierda, línea amarilla*). La huella de la colisión puede encontrarse en todo el planeta en forma de un estrato conocido como «límite K/Pg».

debe considerar el hecho de que los eventos de mayor magnitud no deberían suceder con frecuencia. De hecho, podrían transcurrir millones de años entre los eventos de mayores dimensiones. Siendo así, el verdadero significado de tiempo profundo reside en que, aunque admitamos que los eventos masivos que alteran la Tierra son poco frecuentes, la vasta escala de tiempo geológico prácticamente nos garantiza que tales eventos ocurrirán de vez en cuando. Y son tan extremos que podrían hallarse entre los factores dominantes en la creación del registro geológico. Estudiar la Tierra bajo la máxima uniformista de «el presente es la clave del pasado» ignora la existencia misma del tiempo profundo. En tanto que ocurran grandes eventos a intervalos de tiempo muy largos comparados con el breve período de nuestras observaciones, la probabilidad de que los veamos suceder será baja.

Aunque la mayoría de los geólogos no parecen conscientes de ello, los edictos de Lyell se basaban parcialmente en la suposición, carente de carácter científico, de que habitamos un planeta diseñado para la ocupación humana y que disfrutamos de una historia geológica que representa el despliegue de procesos calmados y metódicos que conducen al mundo actual. La siguiente suposición implica que el cambio, cuando ocurre, es siempre lento y gradual. Según Lyell, ese era el plan de Dios para la Tierra: «En cualquier dimensión en que realicemos nuestras investigaciones, bien sea en el tiempo o en el espacio, hallamos por todas partes las pruebas evidentes de una Inteligencia Creativa y de Su previsión, sabiduría y poder».

UNA NUEVA GEOLOGÍA

La geología se ha centrado tradicionalmente en las escalas locales, las cuales han sido durante largo tiempo el objeto de las investigaciones sobre la Tierra. Para muchos geólogos, las estrellas y los planetas podrían ser puntos de luz situados en una bóveda lejana que ejercen, aparentemente, escasa influencia sobre los eventos que tienen lugar en la superficie de nuestro mundo. Sin embargo, hoy contamos con datos que indican que la historia y la evolución de la Tierra y de la vida guardan un vínculo inextricable con el universo.

A finales del siglo XIX, mientras la geología rehuía las investigaciones diseñadas para explicar catástrofes bíblicas y se acercaba más al planteamiento uniformista de Lyell, la astronomía pasaba de describir los cuerpos celestes a plantear hipótesis sobre la evolución de la Tierra, la Luna, el sistema solar y el universo en general. Aun así, no fue hasta mediados del siglo XX cuando la astronomía comenzó a invadir el terreno de la geología: a medida que se obtenían más y mejores datos sobre la Luna y los planetas, comenzó a ser posible aplicar estudios geológicos a esos cuerpos.

La investigación de los planetas terrestres por las misiones Mariner y la exploración de la Luna por el programa Apolo durante los años sesenta y setenta del siglo pasado puso de manifiesto que la formación de cráteres de impacto y el vulcanismo constituían dos de los principales procesos geológicos que han afectado a otros cuerpos del sistema solar. La geología y la astronomía planetarias pronto se consideraron disciplinas superpuestas. Juntas contribuyeron a una nueva geología del sistema solar y, con ello, dieron un nuevo apoyo a la vieja alternativa a las ideas de Lyell. Al fin y al cabo, ¿por qué se iba a ahorrar la Tierra los desastres cósmicos que son tan evidentes en otros planetas?

Las pruebas obtenidas a finales del siglo XX comenzaban a indicar que había una cierta verdad en la teoría catastrofista de Cuvier, durante tanto tiempo descartada. La extinción de los dinosaurios, acontecida hace 66 millones de años, al final del Cretácico, fue uno de los eventos más misteriosos y debatidos de la historia de la Tierra. Eso cambió cuando se propuso que el fenómeno podría deberse al gran impacto de un asteroide o un cometa, hipótesis sugerida por el equipo formado por Luis y Walter Álvarez, padre e hijo, en 1980.

DETLEV VAN RAVENSWAAY, SCIENCE SOURCE (*cráter*); SIGMA XI, *AMERICAN SCIENTIST* (*mapa*)

LEYES DE LYELL

Dogmas en duda

Las leyes de Lyell han sido durante décadas una de las bases de la geología. Sin embargo, varias observaciones independientes indican que podrían ser erróneas.



OLIVER SPALT, WIKIMEDIA COMMONS (*arriba*); SCIENCE SOURCE (*centro*); ADAM EVANS, WIKIMEDIA COMMONS, CC BY 2.0 (*abajo*)

Planteada por un grupo de científicos inconformistas integrado por un físico (Luis), un geólogo (Walter) y dos expertos en la detección de trazas de elementos químicos (Frank Asaro y Helen Vaughn Michel), la hipótesis de los Álvarez conmocionó las ciencias geológicas. Violaba dos de las leyes de Lyell: se trataba de un evento catastrófico e implicaba la actuación de fuerzas externas a la Tierra. En un principio, la hipótesis del impacto se apoyaba principalmente en el análisis de trazas de iridio, elemento del que la mayoría de los geólogos no sabían nada. Si bien la comunidad geológica tardó en aceptar la hipótesis de los Álvarez y la idea de que un impacto hubiera causado una reacción en cadena que culminara en una extinción en masa, el descubrimiento en 1991 del cráter Chicxulub, en Yucatán, puso fin a buena parte de la resistencia. Con todo, en la actualidad aún hay expertos en dinosaurios que rechazan que sus bestias fueran exterminadas por una roca procedente del espacio.

Poco tiempo después de que se planteara la hipótesis inicial, David Raup y Jack Sepkoski, de la Universidad de Chicago, introdujeron una nueva y sorprendente idea al publicar, en 1984, un artículo que presentaba nuevas pruebas de una aparente recurrencia de las extinciones en masa en ciclos de 26 millones de años. El artículo motivó a los geólogos a investigar si esas extinciones se correlacionaban con un gran impacto y, de esta manera, se inició un activo debate sobre la existencia de ciclos en el registro geológico.

Cuando surgió la hipótesis del impacto, yo estudiaba el vulcanismo y sus efectos sobre el clima en el Instituto Goddard de Estudios Espaciales, de la NASA. Me di cuenta de que la cuestión se convertiría en una de las áreas de estudio más emocionantes, de modo que redirigí mi programa de investigación hacia el posible papel de los impactos en la historia de la Tierra. Richard Stothers, astrofísico de la NASA y experto en literatura clásica romana y griega, trabajaba en la planta de abajo. Al enfocar mi investigación hacia los cataclismos procedentes del espacio, fue toda una suerte contar con un astrofísico como vecino de despacho. Nuestro trabajo conjunto analizó las edades de cráteres de impacto de todo el planeta y determinó un ciclo de unos 30 millones de años, similar al hallado por Raup y Sepkoski para las extensiones en masa. Los datos parecían indicar que los impactos periódicos podrían causar extinciones periódicas. En ese momento, las tres leyes de Lyell —gradualismo, internalismo y ausencia de ciclos— quedaban en entredicho.

Pero incluso entre sus defensores, esta nueva y rompedora hipótesis suscitó acalorados debates sobre los distintos mecanismos propuestos para explicar la periodicidad. Se plantearon diversas hipótesis de índole astronómica que argumentaban que la Tierra podría haber sido bombardeada por lluvias de cometas como resultado de perturbaciones en la distante nube de Oort, el grueso halo de cometas y otros cuerpos helados que orbitan mucho más allá de Neptuno. Mi propia versión sostiene que la perturbación de los cometas podría responder a las oscilaciones del sistema solar, el cual atraviesa de forma cíclica el disco de la Vía Láctea. Otros científicos explicaron las perturbaciones de los cometas mediante la existencia de una hipotética estrella compañera del Sol, bautizada Némesis y que orbitaría más allá de la nube de Oort, o por acción de un planeta de nuestro sistema solar todavía por descubrir, hoy conocido como Planeta X.

En cuanto al modelo galáctico, Stothers y yo planteamos que cuando el sistema solar atravesaba el concurrido plano central de la galaxia, cada 30 millones de años aproximadamente, la concentración de estrellas, gas y polvo —e incluso un hipotético disco de materia oscura, tal y como propusieron hace poco la astrofísica de Harvard Lisa Randall y sus colaboradores— desestabilizaba la nube de Oort y causaba el envío de un alud de cometas hacia la Tierra. Mientras tanto, otros geólogos observaron que, al final del Cretácico, se produjo también la erupción catastrófica de los basaltos de inundación del Deccan, en India, en la que más de un millón de kilómetros cúbicos de lava, emitidos en un período de tiempo relativamente breve, entre decenas y centenares de miles de años, cubrieron un tercio del subcontinente indio. El evento indicaba que el vulcanismo catastrófico también había operado al final del Cretácico y en otros desastres.

La cuestión se complicó todavía más cuando Stothers y yo nos dimos cuenta de que una serie de erupciones voluminosas de basaltos de inundación ocurridas en el pasado se correlacionaban con extinciones y con momentos en que los océanos habían quedado estancados y gravemente empobrecidos de oxígeno. Varios grupos de investigación han defendido que los efectos ambientales derivados de ese tipo de erupciones catastróficas



IMPACTOS CÍCLICOS: El examen del registro rocoso ha demostrado que los principales impactos (*mapa*) muestran una periodicidad media de unos 26 millones de años (*tabla*), ciclo que parece coincidir con el de las grandes extinciones que han jalonado la historia de la vida en la Tierra.

podrían ser lo suficientemente severos para causar extinciones en masa. Así pues, la destrucción podría llegar desde arriba o desde abajo. Quizá las mayores extinciones en masa tengan lugar cuando coinciden diferentes tipos de eventos catastróficos. Se ha propuesto que, de alguna manera, tal vez los grandes impactos puedan provocar la actividad volcánica, o que podría existir incluso una conexión más profunda.

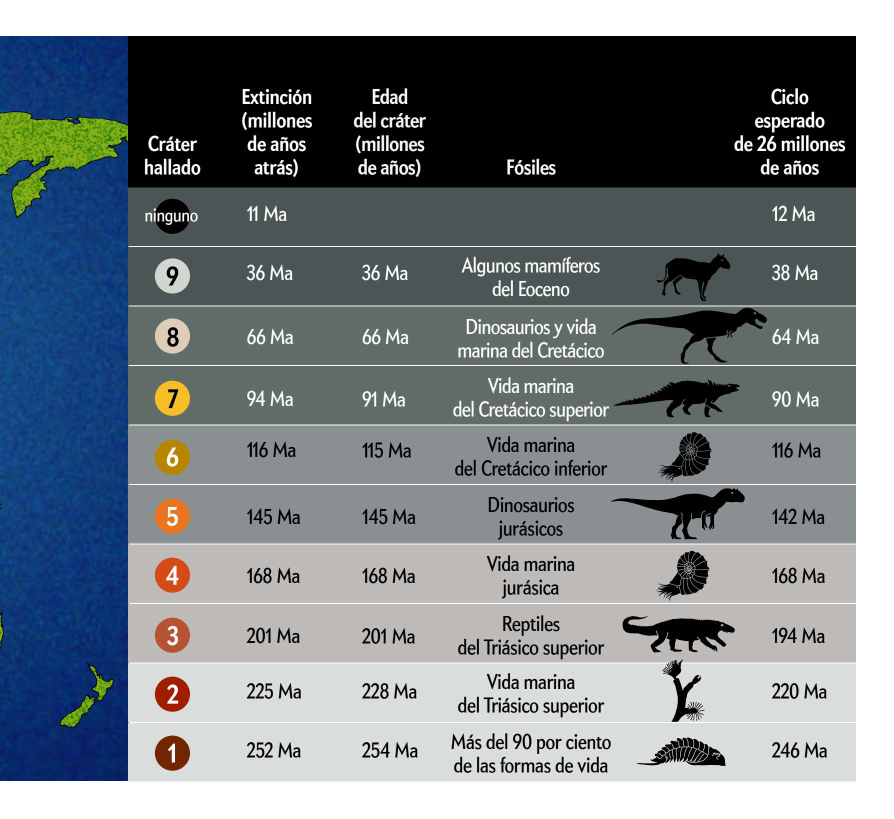
En los años ochenta, cuando trabajaba para la NASA, observé que algunos eventos geológicos, como el vulcanismo masivo, la construcción de montañas, la creación de puntos calientes volcánicos y las fluctuaciones del nivel del mar y del clima (todos relacionados mediante la tectónica de placas), parecían seguir ciclos similares de unos 30 millones de años. Esa periodicidad aparente ya había sido señalada por otros geólogos a comienzos del siglo xx, pero fue mayormente ignorada por una comunidad científica, inmersa en el uniformismo de Lyell. Aunque esos eventos dispares parecían tener causas igualmente diversas, varios investigadores se han preguntado si podría existir alguna conexión entre ellos.

Podemos imaginar un escenario hipotético basado en la astrofísica y la materia oscura. Supuestamente compuesta por partículas distintas de las que conforman la materia visible, la materia oscura permite explicar numerosos fenómenos del universo. Estamos investigando la posibilidad de que la materia oscura, concentrada en acumulaciones próximas al plano medio de la Vía Láctea, hubiera podido quedar atrapada en el núcleo de la Tierra al cruzar el plano el sistema solar. Después, la materia oscura se habría desintegrado en el núcleo de la Tierra, lo que habría liberado una gran cantidad de energía. Dado que el manto terrestre es inestable, el exceso de calor en el núcleo conllevaría un aumento de la temperatura en la capa límite entre el núcleo y el manto. Ese pulso de calor podría generar una pluma de manto, una columna ascendente de roca mantélica caliente. Cuando tales plumas alcanzan la corteza, originan un punto caliente volcánico y desencadenan un vulcanismo que emite basaltos de inundación, lo que causa la fracturación continental y el inicio de una nueva fase de expansión del fondo oceánico.

De ese modo, podemos distinguir pulsos de actividad geológica y vulcanismo que muestran el mismo ciclo de 30 millones de años con el que se observan impactos y extinciones en masa, todos derivados de una causa extraterrestre común. Hoy, tanto la materia oscura como los ciclos catastróficos que afectan a la Tierra son objeto de una intensa investigación. El descubrimiento de los Álvarez y los subsiguientes estudios podrían representar el inicio de una nueva geología del siglo xxi: una geología de cataclismos que considera los efectos que ejercen la galaxia y el sistema solar sobre nuestro planeta. La idea de que una serie de factores astronómicos pudieran controlar los procesos geológicos a largo plazo que tienen lugar en la Tierra sería verdaderamente revolucionaria.

CONTRA LA TEOLOGÍA NATURAL

Los últimos 35 años de descubrimientos en ciencias de la Tierra ponen de manifiesto que las tres leyes de Lyell, los pilares de la geología moderna, podrían ser erróneas. Al menos dos de ellas lo son claramente. En primer lugar, los cambios geológicos no siempre son lentos y graduales. Tanto los impactos de asteroides y cometas como las erupciones de basaltos de inundación causan cambios rápidos e irrevocables en el entorno terrestre. En segundo lugar, las fuerzas que rigen la evolución biológica y geológica del planeta podrían no ser terrestres, a juzgar por las huellas de impactos de asteroides y la interacción de la materia oscura. En tercer lugar, siendo este el punto más especulativo,



Cráter hallado	Extinción (millones de años atrás)	Edad del cráter (millones de años)	Fósiles	Ciclo esperado de 26 millones de años
ninguno	11 Ma			12 Ma
9	36 Ma	36 Ma	Algunos mamíferos del Eoceno	38 Ma
8	66 Ma	66 Ma	Dinosaurios y vida marina del Cretácico	64 Ma
7	94 Ma	91 Ma	Vida marina del Cretácico superior	90 Ma
6	116 Ma	115 Ma	Vida marina del Cretácico inferior	116 Ma
5	145 Ma	145 Ma	Dinosaurios jurásicos	142 Ma
4	168 Ma	168 Ma	Vida marina jurásica	168 Ma
3	201 Ma	201 Ma	Reptiles del Triásico superior	194 Ma
2	225 Ma	228 Ma	Vida marina del Triásico superior	220 Ma
1	252 Ma	254 Ma	Más del 90 por ciento de las formas de vida	246 Ma

podrían darse grandes ciclos geológicos regidos por factores astronómicos, como prueban las extinciones observadas en el registro fósil, ocurridas cada 26 millones de años.

Desde esa nueva perspectiva, parece que Lyell presentó una visión, en gran parte teórica, de una naturaleza organizada por un orden divino, a pesar de las pruebas de la existencia de cambios repentinos en el registro geológico. Lyell y quienes desde entonces han adoptado su planteamiento sostenían, erróneamente, que las velocidades de los procesos geológicos conocidos no han variado. Los datos demuestran lo contrario. En el registro geológico han quedado grabados terremotos violentos, erupciones volcánicas catastróficas, inundaciones repentinas y tsunamis.

En geología persiste una importante cuestión que se remonta a los primeros tiempos de la ciencia. Se trata de una que hunde sus raíces en la teología natural de nuestros predecesores y que pasamos por alto o que está presente solo de forma inconsciente. Cuando se reconoce a Lyell como una de las grandes figuras de la geología, no suele mencionarse su inclinación religiosa. Pero no cabe duda de que la teología impregnaba su defensa del uniformismo. Esa misma perspectiva puede ser, en parte, la razón por la que algunos geólogos todavía se muestran reticentes a recurrir a eventos catastróficos aun cuando las pruebas geológicas apuntan a ellos. Es demasiado pronto para afirmar que la hipótesis periódica es correcta; pero, al menos, por fin estamos investigando abiertamente para saber si lo es.

Muchos geólogos están cegados por el hecho de que la Tierra es nuestro hogar. El estudio de la Tierra es el estudio de nuestro planeta y, por tanto, resulta difícil mantener una postura objetiva al investigar su historia. Para los fundadores de la geología, inmersos en la teología, la Tierra era un lugar creado por una deidad benefactora con el fin de convertirse en la residencia ordenada y pacífica de la humanidad. ¿Por qué debería experimentar forzosamente catástrofes periódicas que causan la desaparición de numerosas formas de vida? Ese planteamiento traicionaría la idea central de la Tierra como morada del ser humano regalada por Dios. El cambio geológico no podía ser «obra de un accidente o el efecto de una transacción ocasional» como los encuentros con cometas o como los cataclismos volcánicos de repercusión global, por citar a Hutton.

Por lo visto, en la geología moderna todavía perviven ciertos aspectos de esa vieja teología natural. Muchos geólogos experimentan una especie de espiritualidad al estudiar la Tierra. Nos sentimos cerca de la naturaleza y reflexionamos sobre la inmensidad del tiempo geológico. ¿Van a abandonar los geólogos esa acogedora sensación para enfrentarse a una historia terrestre llena de eventos catastróficos y cíclicos? Para la mayoría de los geólogos, contemplar los efectos, en general benignos, que causan los lentos procesos de erosión y sedimentación en la modificación del paisaje ofrece cierta seguridad de que el mundo, si no hecho para los humanos, sí es al menos compatible con su supervivencia. Las extinciones, cuando ocurrieron, fueron el resultado de una justa competición entre especies en la que sobrevivieron los organismos mejor adaptados.

Los nuevos hallazgos en geología catastrófica demuestran que nuestra serena sensación de estar en casa, en una Tierra regida por las leyes de Lyell que describen un cambio leve y gradual, necesita una revisión. Pero mirar al cosmos para explicar eventos extraordinarios acontecidos en nuestra historia no debe restar valor al sentimiento de asombro ante la grandeza de nuestro planeta. De hecho, debería reforzarlo. Los geólogos actuales que solo se centran en causas terrestres y graduales para explicar eventos geológicos podrían estar desaprovechando una importante conexión entre la geología y la astronomía. Y, por tanto, se estarían privando de ampliar su conocimiento sobre nuestro vibrante campo de estudio y del lugar que ocupa la Tierra en el universo. IyC

SIGMA XI, *AMERICAN SCIENTIST*

PARA SABER MÁS

Extraterrestrial cause of the Cretaceous/Tertiary extinction: Experimental results and theoretical interpretation. L. W. Alvarez et al. en *Science*, vol. 208, págs. 1095-1108, junio de 1980.
Periodicity of extinctions in the geologic past. D. M. Raup y J. J. Sepkoski en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 81, págs. 801-805, febrero de 1984.
Major episodes of geologic change: Correlations, time structure and possible causes. M. R. Rampino y K. Caldeira en *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 114, págs. 215-227, enero de 1993.
Disc dark matter in the galaxy and potential cycles of impacts, mass extinctions, and geological events. M. R. Rampino en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 448, págs. 1816-1820, abril de 2015.
La materia oscura y los dinosaurios. Lisa Randall. Acantilado, 2016.
Cataclysms: A new geology for the twenty-first century. Michael R. Rampino. Columbia University Press, 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

El origen del agua en la Tierra. David Jewitt y Edward D. Young en *IyC*, mayo de 2015.
Erupciones volcánicas y extinciones masivas. Howard Lee en *IyC*, agosto de 2016.

BIOLOGÍA

La masa devoradora: una célula gigante e inteligente

El mixomiceto *Physarum polycephalum*, una suerte de moho formado por una sola célula, puede aprender e incluso transmitir su conocimiento

Audrey Dussutour y David Vogel

La diversidad de formas de vida en la Tierra va más allá de nuestra imaginación y no deja de sorprendernos. De entre el inmenso número de seres vivos, los organismos multicelulares son los más conocidos, tanto desde el punto de vista fisiológico como del comportamiento. Así, todos conocemos la capacidad de orientación de las palomas, de fotosíntesis de las plantas, de aprendizaje del perro o incluso de construcción de las hormigas. Por el contrario, las aptitudes de los organismos unicelulares, a menudo descritas como simples, son bastante desconocidas.

AUDREY DUSSUTOUR (CNRS)



EL MIXOMICETO *PHYSARUM POLYCEPHALUM*, también conocido como moho de muchas cabezas, recuerda a la «masa devoradora», el monstruo de una película de los años cincuenta. A pesar de que es menos peligroso que aquel, resulta casi inmortal. Resiste al fuego y al agua, cicatriza en unos minutos, puede cortarse en varias piezas y cada una de ellas se convierte en una nueva masa devoradora.

Sin embargo, los seres unicelulares presentan comportamientos que no tienen nada que envidiar a los observados en otros organismos: algunos son capaces de comunicarse, de orientarse, de cooperar, de construir refugios... Un ejemplo sorprendente es la capacidad de aprendizaje que hemos descubierto recientemente en un organismo unicelular de forma y tamaño indefinidos, viscoso y de color amarillo intenso: el mixomiceto *Physarum polycephalum*, también conocido como moho de muchas cabezas.



Audrey Dussutour es investigadora del Centro de Investigación sobre Cognición Animal del Centro Nacional para la Investigación Científica de Francia, en Toulouse.

David Vogel es investigador posdoctoral de la Escuela de Agricultura, Alimentación y Enología de la Universidad de Adelaida.

ORGANISMO INCLASIFICABLE

El lugar que ocupa este ser en el árbol de la vida ha resultado durante mucho tiempo incierto. Para clasificar un organismo, se empieza por especificar el reino (animal, vegetal, etcétera) al que pertenece. Pero ¿qué sucede con *P. polycephalum*, que tiene afinidades tanto con el reino vegetal como con el animal, así como con el de los hongos? En 1753, el naturalista Carlos Linneo clasificó los mixomicetos entre las plantas, basándose en su forma de producir pigmentos y en la diversidad de estos últimos. Tal variedad recuerda a la de las plantas, ya que hay mixomicetos (más de mil especies conocidas hoy en día) de todos los colores.

Sin embargo, en 1833, el botánico Heinrich Link clasificó *P. polycephalum* en el reino de los hongos debido a su modo de reproducción, parecido al de estos organismos. Efectivamente, la vida de esta especie comienza con la fusión de dos gametos (también llamados amebas), que son células haploides que contienen solo una copia de cada cromosoma. La fusión solo tiene lugar si las amebas son de diferente tipo sexual, lo que es muy probable que suceda ya que en *P. polycephalum* hay 720 tipos sexuales. La célula nacida de esta fusión crece, pero sin dividirse. Solo su núcleo se divide y da dos núcleos, que se dividen a su vez y así sucesivamente. La célula puede alcanzar un tamaño récord, del orden de varios metros cuadrados, y contener miles de millones de núcleos. (A modo de comparación, una célula humana mide de promedio solo 10 micrómetros de diámetro.)

Esta gigantesca célula multinucleada se llama plasmodio, pero podríamos llamarla «masa devoradora» debido a su apariencia. Generalmente es de color amarillo y vive en zonas templadas, húmedas y oscuras, como el sotobosque. Cuando los alimentos comienzan a fallar, la masa desencadena la esporulación y forma miles de órganos llamados esporangios. Son una especie de esferas de unos 0,5 milímetros de diámetro que descansan sobre un pie muy fino. Estas bolas iridiscentes contienen esporas, como los hongos, que serán diseminadas por el viento, el agua y los animales, y que se convertirán en amebas haploides cuando alcancen un ambiente propicio.

No obstante, debido a que *P. polycephalum* se desplaza para nutrirse, una conducta que evoca la de los animales, en 1859 el cirujano, botánico y microbiólogo alemán Anton de Bary lo clasificó en el reino animal. Este organismo puede desplazarse a una velocidad de varios centímetros por hora para alimentarse de esporas, bacterias y hongos. Carece de boca y engulle la comida por fagocitosis. Muchas voces se alzaron contra la propuesta de Bary, por lo que la especie estuvo escaso tiempo clasificado como animal y quedó confinado de nuevo entre los hongos hasta los años setenta del siglo xx.

El genoma de *P. polycephalum* terminó de secuenciarse en diciembre de 2015. Como resultado de este trabajo, se clasificó en el grupo de los amebozoos (en el reino animal), que incluye todos los mixomicetos. Los amebozoos son organismos unicelulares que producen pseudópodos (prolongaciones temporales de la célula) y cambian de forma a medida que se mueven. Pero ¿cómo se desplazan? La masa ameboide está atravesada por una red de venas por donde circula el protoplasma, un líquido rico en nutrientes y otras moléculas esenciales para la vida del organismo, y se desplaza gracias a esa red. La corriente en las venas se invierte cada dos minutos. Sin embargo, esta alternancia de un sentido a otro no es estrictamente simétrica: el flujo es mayor en la dirección de desplazamiento elegida. El organismo entero avanza debido a la presión de la corriente ejercida sobre la membrana.

EN SÍNTESIS

Physarum polycephalum no es ni un animal, ni una planta, ni una seta.

Este organismo unicelular es sorprendente en muchos aspectos: presenta una diversidad de 720 sexos, puede desplazarse varios centímetros por hora y es fácil de clonar.

Aunque carece de neuronas, para alcanzar el alimento puede aprender, por habituación, a cruzar un puente cubierto de una sustancia repulsiva.

Más sorprendentemente, una masa de *P. polycephalum* puede transmitir a otra su capacidad de cruzar dichos puentes.

UN BUEN ALUMNO

Si este mixomiceto ya demostró su carácter singular, aún no ha dejado de sorprender. Sus increíbles habilidades incluyen encontrar el camino más corto en un laberinto o diseñar redes optimizadas. En 2016, con Romain Boisseau, ahora en la Universidad de Montana, demostramos que la masa ameboide podía aprender y también transmitir a otra masa un comportamiento aprendido. Hasta entonces, tales habilidades no se habían observado ni en *P. polycephalum* ni en ningún otro organismo unicelular.

En nuestro experimento, este mixomiceto pudo realizar y transmitir a un congénere un tipo particular de aprendizaje: la habituación, que se define como la atenuación progresiva de una respuesta conductual a un estímulo inofensivo presentado de manera repetitiva. El ejemplo de un gato que retira la pata al tocársela ilustra esta noción. El estímulo inofensivo de tocar la pata de un gato provoca una respuesta de comportamiento, la retirada de la pata. Pero la repetición de esta acción en un corto período de tiempo hace que el gato retire su pata cada vez menos. En algunos casos, la respuesta conductual puede ir disminuyendo hasta que desaparece y el animal deja de mover la pata.

Para que el comportamiento observado se considere habituación tienen que cumplirse otros dos criterios: que la respues-

Singamia (fusión de dos gametos)
Zigoto (celula diploide)
Plasmodio (célula multinucleada)
División múltiple del núcleo
Gameto o ameba (célula haploide)
Diseminación
Espora
Esporangio
Germinación de la espora
Esporulación (formación de esporangios que contienen esporas)

CICLO BIOLÓGICO DE *P. POLYCEPHALUM*. Su reproducción mediante esporas recuerda a la de los hongos. De ahí que los biólogos del siglo XIX clasificaran erróneamente los mixomicetos como hongos.

ta conductual sea específica del estímulo y que se recupere el estado inicial si no se repite el estímulo al cabo de un tiempo. Si volvemos al ejemplo del gato, esto significa que cualquier estimulación que no sea tocarle la pata, como verterle agua por encima, debe provocar la retirada de la pata; además, esta reacción debe aparecer de nuevo si no se le toca la pata durante un tiempo.

Para estudiar la habituación en un organismo unicelular, primero hay que encontrar una estimulación inofensiva que provoque una respuesta conductual mensurable. Pero los mixomicetos son quimiotácticos, es decir, dirigen su movimiento de acuerdo con las moléculas presentes en su ambiente. Por lo tanto, cuando estén en presencia de una molécula repelente, se desplazarán en la dirección opuesta o, si no pueden evitarla, crecerán lentamente y de manera que entren en contacto lo menos posible con esa sustancia. Por el contrario, si están en presencia de una molécula neutra o atrayente, tienden a crecer más rápido y a diseminarse a su alrededor. El carácter quimiotáctico del plasmodio, o masa, de *P. polycephalum* cumplió todos los criterios para estudiar la habituación en este mixomiceto.

Este comportamiento se puso de manifiesto al forzar repetidamente a los plasmodios a cruzar un puente que contenía una concentración precisa de una molécula repelente, como la sal común, para llegar a una fuente de alimento. A cada cruce de puente, comprobábamos la velocidad de desplazamiento y la forma del plasmodio para averiguar si, a lo largo de las repeticiones, estos dos parámetros cambiaban. Además, para garantizar la especificidad del estímulo, utilizamos diferentes moléculas para ver si un plasmodio acostumbrado a una molécula no lo



EN LOS EXPERIMENTOS, los plasmodios de *P. polycephalum* (*arriba, en amarillo*) están separados de su alimento (*abajo, en blanco*) por puentes cubiertos con sal. El mixomiceto aprende a cruzar este camino cada vez más deprisa, a pesar de la aversión a la sal, con la finalidad de alimentarse.



EL MIXOMICETO *P. POLYCEPHALUM* se desarrolla en zonas húmedas. A menudo se lo encuentra en el sotobosque, donde se alimenta principalmente de hongos. En el laboratorio, los investigadores le ofrecen copos de avena, que devora con avidez.

estaba a las otras. Por último, se planeó un período de descanso después de la habituación para verificar que había un retorno al comportamiento inicial.

Los resultados de estos experimentos fueron indiscutibles: los plasmodios eran capaces de acostumbrarse a una molécula específica. La primera vez que tuvieron que cruzar el puente les llevó mucho tiempo y establecieron escaso contacto con él. Pero luego lo hicieron cada vez más rápido y se extendieron más en la superficie del puente, lo que demostraba su habituación a la molécula. Además, las masas que se habían acostumbrado a la sal no lo hacían con otras moléculas, y después de una fase de descanso su comportamiento se asemejó de nuevo al del primer cruce.

La investigación sobre la habituación del mixomiceto no se detuvo con este descubrimiento. Pero antes de ir más lejos, destacaremos otras dos características de este organismo. Un plasmodio puede cortarse en muchos fragmentos que, tras un breve tiempo de descanso, actuarán igual que otros tantos plasmodios autónomos. Por el contrario, numerosos plasmodios presentes en un mismo ambiente pueden percibirse mutuamente y acercarse para fusionarse y formar un solo organismo.

Después de estos diferentes resultados y observaciones, surgió una pregunta lógica: ¿podría un mixomiceto acostumbrado a una molécula transferir su habituación a otro que no hubiese estado en contacto con ella? Para responderlo, realizamos varios experimentos. Se permitió que un plasmodio habituado a la sal común se fusionara con otro que nunca había estado en contacto con ella para formar un plasmodio mixto. Los plasmodios usados como control procedían de la fusión de dos habituados o dos noveles y tenían que cruzar un puente cubierto de sal. Pues bien, los organismos mixtos fueron tan rápidos como los habituados a la sal, sobre todo, mucho más que los noveles.

Luego decidimos poner a prueba los plasmodios ya no en grupos de dos, sino de tres y de cuatro para saber si la información pasaba de uno a otro. Algunos de estos grupos estaban constituidos únicamente por organismos habituados o noveles, y otros incluían uno o dos organismos habituados. Se colocaron todos uno al lado de otro, en una línea, y se los dejó fusionarse gradualmente. El resultado fue el mismo que con los pares mixtos: cualquiera que fuese el número de plasmodios noveles, para que la información circulase era suficiente que uno solo del grupo hubiese tenido la experiencia previa.

Para verificar que hubo realmente transferencia de información entre los dos plasmodios y que el habituado no se imponía simplemente al novel, repetimos el experimento pero separando los dos plasmodios después de unas horas de fusión. Luego se analizaron individualmente para ver si el que inicialmente era novel tardaba el mismo tiempo que el habituado en cruzar el puente que contenía sal. El experimento demostró que los organismos noveles y los habituados cruzaban el puente a la misma velocidad siempre que la fusión hubiese durado al menos tres horas. Al observar los mixomicetos más de cerca, bajo el microscopio, notamos que después de tres horas de fusión se formaba una vena entre ellos. La información que uno intercambia con otro parece, pues, que circula por sus venas.

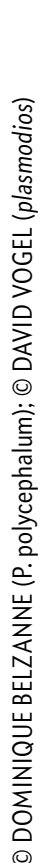
MISTERIO NO RESUELTO

Los mecanismos precisos que permiten a un plasmodio acostumbrarse a una sustancia y transmitir a otro esa conducta son aún desconocidos para nosotros. No obstante, varias hipótesis pueden explicar estos resultados. En la primera intervienen receptores extramembrana sensibles a varias moléculas. De acuerdo con esta idea, la presentación repetida de una molécula induciría una modificación temporal de la estructura de los receptores, lo que aumentaría su umbral de activación. Este efecto haría que las masas fueran menos sensibles a la molécula y, por lo tanto, redujeran la reacción de aversión. Pero esta teoría parece difícil de conciliar con la transferencia de la habituación, ya que el traspaso de receptores entre la masa habituada y la novel es poco probable.

La segunda hipótesis invoca una modificación epigenética del ADN (la cual corresponde a una modulación local de la expresión de ciertos genes). Por lo tanto, una modificación epigenética de

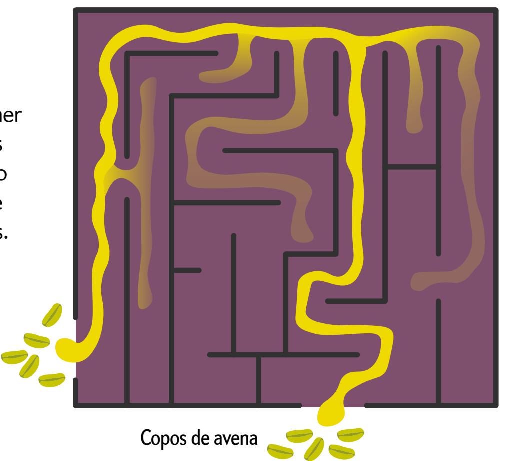


CUANDO DOS PLASMODIOS ENTRAN EN CONTACTO, sus membranas se fusionan y aparece una vena que conecta los dos organismos. Probablemente sea a través de este canal que el aprendizaje de un plasmodio se transmite a otro.



Una célula que adivina y planifica

En el 2000, Toshiyuki Nakagaki, de la Universidad de Hokkaido, ganó su primer premio Ig Nobel (una parodia de premio Nobel que recompensa investigaciones insólitas) al demostrar que *P. polycephalum* podría encontrar el camino más corto para salir de un laberinto. Y ganó un segundo premio Ig Nobel al demostrar que también podía planificar redes ferroviarias o de otro tipo mejor que los humanos.



El laberinto

Los plasmodios colocados en un laberinto tuvieron que identificar dos fuentes de nutrientes, ubicadas cada una en una salida diferente. Los plasmodios primero se extendieron y se fusionaron entre sí para formar únicamente uno que llenó, él solo, el laberinto. Una vez localizados los dos puntos de comida, el plasmodio abandonó las trayectorias innecesarias para tomar el camino más corto que conectaba las dos salidas.





La red ferroviaria de Tokio

Toshiyuki Nakagaki recreó un minimapa de la región metropolitana de Tokio en una caja y colocó un copo de avena en la ubicación de cada ciudad de la región. Luego colocó un plasmodio en la ubicación de Tokio y lo dejó que explorase su entorno. Cada vez que la masa encontraba un copo de avena, extendía una vena entre su posición inicial y el copo. De ese modo, al final del experimento el mixomiceto había formado una red más eficiente y robusta que la red ferroviaria existente. En la red del mixomiceto, todas las ciudades se mantenían conectadas aunque se rompiera un enlace, y las rutas tomadas parecían ser más cortas y menos redundantes.

los genes que producen proteínas implicadas en la regulación de la recepción de ciertas moléculas reduciría la sensibilidad a estas. La fusión de dos plasmodios permitiría intercambiar esas proteínas, y así un mixomiceto novel se volvería menos sensible a una molécula repelente con la que no hubiese entrado antes en contacto.

De acuerdo con la tercera hipótesis, la más austera y elegante, el mixomiceto incorporaría los repelentes al citoplasma que circula dentro de la red de venas, que actúa como una forma de memoria. De este modo, el citoplasma se enriquecería con sal a fuerza de cruzar los puentes de sal y esta ya no afectaría al mixomiceto puesto que habría poca diferencia en la concentración de sal entre el exterior y el interior de la célula.

Cada vez hay más estudios que demuestran que organismos tradicionalmente considerados simples pueden acabar por sorprendernos. El uso del término *aprendizaje* podría parecer inapropiado para describir el comportamiento de un ser unicelular. Solemos usar este término para referirnos a los humanos o a los animales próximos a nosotros, o incluso a los insectos, pero en ningún caso a organismos que carezcan de sistema nervioso. Sin embargo, el comportamiento de este mixomiceto está en consonancia con las definiciones de aprendizaje. Desde un punto de vista evolutivo, sin embargo, estos resultados no sorprenden. La evolución de una conducta corresponde a una modificación muy lenta de un carácter que al principio tiene funciones o mecanismos potencialmente diferentes. El tipo de aprendizaje observado en este mixomiceto sería entonces una forma primitiva del modo de aprendizaje que observamos hoy en organismos dotados de sistema nervioso o de cualquier otro mecanismo que sustente la misma función, es decir, una adaptación óptima al entorno.

UN MODELO BIOLÓGICO

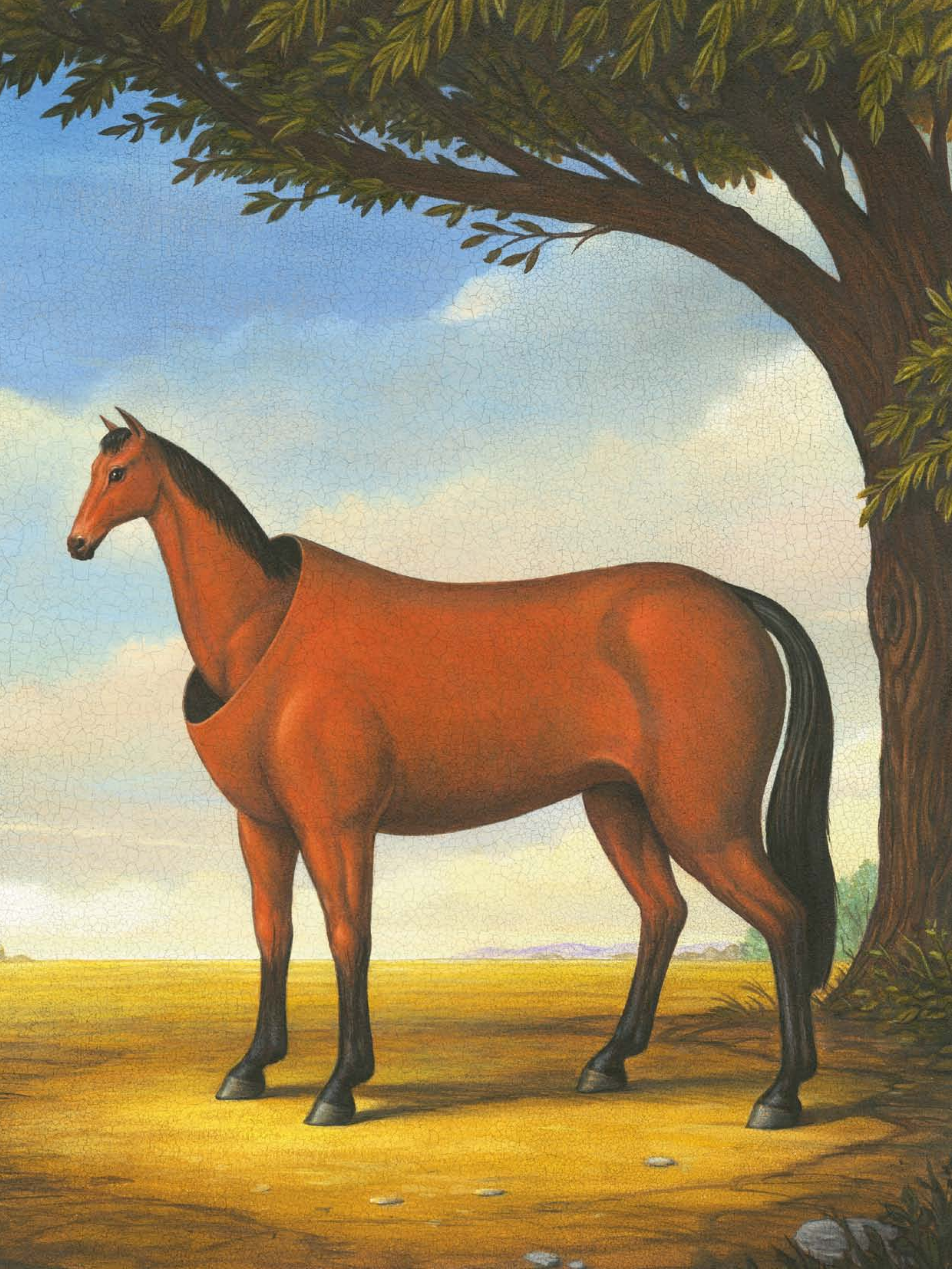
Por supuesto, el uso de un modelo biológico como *P. polycephalum* no pretende responder a todos los grandes interrogantes de la biología. Pero este organismo ofrece un marco bastante simple para comprender con mayor precisión la articulación entre el funcionamiento intracelular (molecular y genético) y la expresión de un comportamiento. Al no ser más que una célula, todos los cambios intracelulares en *P. polycephalum* pueden repercutir en el medio extracelular. En cambio, para los organismos formados por distintos niveles biológicos (moléculas, células, órganos), debemos estudiar todos estos niveles para comprender cómo interaccionan y cuál es su impacto en el comportamiento: una tarea mucho más compleja que con la masa de este mixomiceto. IyC

PARA SABER MÁS

Habituation in non-neural organisms: Evidence from slime moulds. R. P. Boisseau et al. en *Proceedings of the Royal Society B*, vol. 283:20160446, abril 2016.

Direct transfer of learned behaviour via cell fusion in non-neural organisms. D. Vogel y A. Dussutour en *Proceedings of the Royal Society B*, vol. 283:20162382, diciembre de 2016.

Tout ce que vous avez toujours voulu savoir sur le blob sans jamais oser le demander. A. Dussutour. Éditions des Équateurs, 2017.



CAMBIO CLIMÁTICO

ENANISMO EN ALZA

El auge de las temperaturas parece estar reduciendo el tamaño de todo tipo de animales, una tendencia con repercusiones inquietantes

Marta Zaraska

Ilustración de Marc Burckhardt

EN SÍNTESIS

El registro fósil nos revela que hace millones de años, cuando las temperaturas subían, el tamaño de la fauna menguaba.

Hoy, conforme el planeta se calienta, ese fenómeno se ha observado en peces, serpientes, ovejas, mariposas, salamandras y roedores.

La tendencia al enanismo podría ser la respuesta al efecto de la temperatura sobre el metabolismo; tal cambio podría afectar a la cadena trófica y a los ecosistemas del planeta.

Marta Zaraska es redactora científica y autora del libro *Meathooked: The history and science of our 2.5-million-year obsession with meat* (Basic Books, 2016).



El mundo se calentó con suma rapidez hace 56 millones de años. En solo 10.000 años, un abrir y cerrar de ojos en la escala de tiempo geológica, la temperatura se disparó hasta en 8 ºC, según los datos paleoclimáticos. En una llanura pantanosa del actual estado de Wyoming, la temperatura media anual se encaramó hasta los 26 ºC, similar a la de la costa tropical de Indonesia. Un morador de esos parajes era un animal menudo y parduzco de orejas puntiagudas y largas patas adaptadas para correr a grandes zancadas bajo el calor. De unos 4 kilos, su talla era similar a la de un perro Terrier. Pero era un caballo.

Antes del calentamiento, los équidos prehistóricos no eran precisamente sementales árabes: con unos 5,5 kg, más bien semejaban antílopes enanos. Pero menguaron espectacularmente al inicio de ese período, conocido como el Máximo Térmico del Paleoceno-Eoceno. En concreto, el cuerpo de este équido de nombre científico *Sifrhippus* se redujo en un asombroso 30 por ciento. Ese fenómeno de enanismo evolutivo no acabó ahí, señala Abigail D'Ambrosia Carroll, doctoranda en ciencias ambientales de la Universidad de New Hampshire que estudia el registro fósil de este grupo zoológico. Durante una fase posterior del calentamiento, tres millones de años después, sobrevino una nueva reducción de la talla en muchos linajes de équidos, según una investigación publicada en 2017. Otros mamíferos, como un ancestro del ciervo de dimensiones similares a las de un conejo, también menguaron.

La relación entre el enanismo y el aumento de la temperatura no es solo cosa del pasado. Multitud de especies están experimentando el mismo fenómeno conforme el planeta se calienta. El sapo común ha menguado, de igual modo que las iguanas marinas, las serpientes, las tortugas, las salamandras, algunas ratas de campo norteamericanas (*Neotoma*), las moscas del estiércol (escatofágidos), las mariposas del Ártico, varios peces del mar del Norte y una especie de óvido. La razón de esta tendencia ha mantenido en vilo a los expertos, pero varios experimentos, observaciones de campo y el registro fósil nos dejan entrever la respuesta. La explicación radica en las necesidades energéticas: un cuerpo más pequeño que requiera menos energía puede ser conveniente cuando el entorno deviene más cálido, por lo que la evolución de la fauna en las zonas calurosas favorece la aparición de individuos de menor talla con el paso de las generaciones. «Creo que estamos más cerca de descifrar esos mecanismos», destaca Janet Gardner, bióloga de la Universidad Nacional Australiana, en Canberra. Aparte de resolver un misterio biológico, el entendimiento del fenómeno deja al descubierto un nuevo motivo de preocupación sobre los efectos del cambio climático. «En caso extremo, el enanismo podría abocar a la extinción, o generar alteraciones de la cadena trófica o de otros procesos ecológicos que podrían afectar directamente a ciertos animales beneficiosos para el género humano», advierte Michael Sears, biólogo evolutivo de la Universidad de Clemson. Un estudio señala que en los próximos 30 años podríamos asistir al empequeñecimiento de numerosas especies piscícolas de todo el mundo. Y aunque la magnitud del cambio es objeto de debate, muchos coinciden en que podría acarrear consecuencias graves que se propagarían a los siguientes eslabones de la cadena trófica.

La conexión climática

El registro fósil puede ser sumamente revelador a la hora de establecer una sólida relación entre la temperatura y el tamaño corporal. Un animal que nos ha regalado un gran volumen de datos es la rata de campo de cola peluda (*Neotoma cinerea*). El diámetro de sus excrementos guarda una estrecha relación con la talla del artífice. Las heces fosilizan bastante bien, por lo que dejan consigo un registro sedimentario muy dilatado en el tiempo, susceptible de ser analizado de año en año. Cuando especialistas de la Universidad de Nuevo México y del Servicio Geológico de EE.UU. se pusieron a revisar 25.000 años de datos de estos coprolitos para un estudio publicado en 1995, descubrieron que la talla de este roedor había ido fluctuando a lo largo de ese período al albur de los cambios del clima.

¿Por qué existe esa conexión? Hemos de remontarnos hasta el siglo XIX, cuando el biólogo alemán Carl Bergmann apuntó a la necesidad de regular el calor corporal como posible razón. Observó que la fauna de sangre caliente (homeoterma) propia de las latitudes altas y frías tendía a ser más grande que los mamíferos próximos al ecuador y que, además, presentaba menos superficie corporal en relación con su peso; cerca de los polos no hallaremos cuellos estilizados como el de la jirafa, ni patas alargadas como las del avestruz. Bergmann postuló que para todo mamífero es más fácil conservar el calor si la relación entre la superficie del cuerpo y el peso es baja (cuando nos acurrucamos al sentir frío reducimos la superficie expuesta). Con todo, esta hipótesis no explica los cambios observados en los insectos, los peces y otra fauna que no es homeoterma.

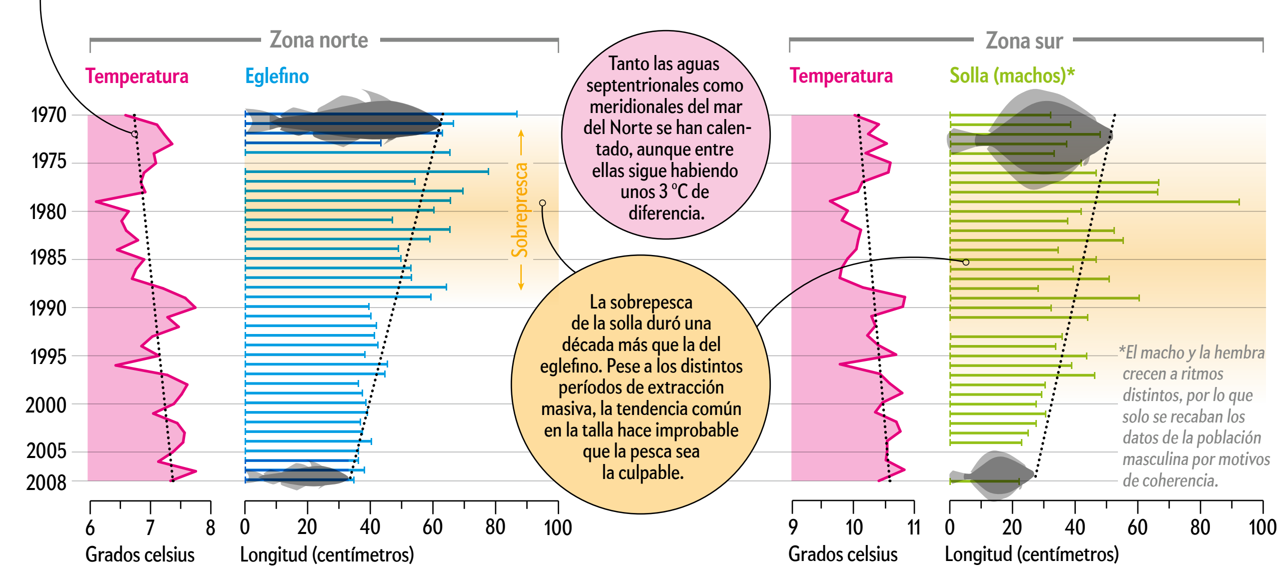
Una serie de avanzados experimentos de laboratorio con distintos animales está arrojando una explicación más satisfactoria: muchos creen que el incipiente fenómeno de enanismo puede ir ligado a cambios del metabolismo y de las necesidades de alimento que de ellos derivan. Se ha comprobado que las crías de muchas especies crecen al principio más rápido si se las introduce en un entorno más caluroso, pero también alcanzan antes la madurez. El resultado es un adulto de un tamaño menor del que hubiese adquirido en un ambiente frío (imagine nuestra estatura si completáramos el crecimiento a los ocho años; sin duda seríamos mucho más bajos). Andrew Hirst, biólogo

Pez grande, pez chico

Los datos de las capturas pesqueras en el mar del Norte correspondientes a 39 años revelan un paralelismo entre el auge de la temperatura y la reducción de la talla. Durante ese tiempo el eglefino, capturado en el norte (*zona azul del mapa*), y la solla, pescada en el sur (*zona verde*), menguaron de tamaño. La temperatura del agua subió durante esos años, tanto en el norte como en el sur. En conjunto, nueve de las 13 poblaciones de peces estudiadas han seguido esa tónica de reducción a medida que el agua se calentaba.

0 100 200 kilómetros
NORUEGA
Zona norte
SUECIA
MAR DEL NORTE
DINAMARCA
Zona sur
IRLANDA
REINO UNIDO
HOLANDA
ALEMANIA
BÉLGICA
FRANCIA

Las líneas punteadas trazan la tendencia general independientemente de las fluctuaciones anuales, calculada a partir de los cambios de la temperatura y la talla de los peces.



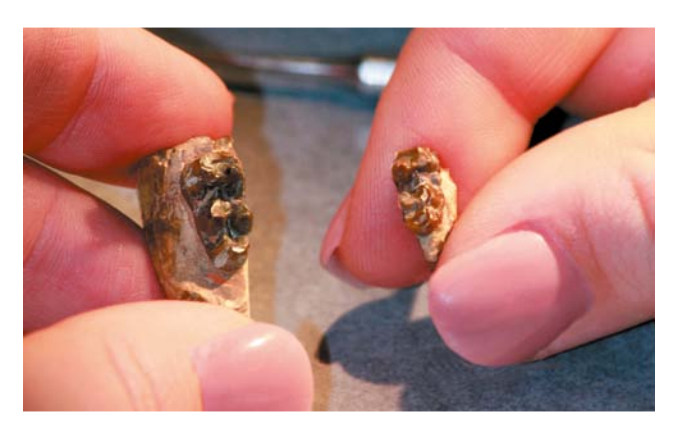
FUENTES: ALAN R. BAUDRON (COMUNICACIÓN PERSONAL); «WARMING TEMPERATURES AND SMALLER BODY SIZES: SYNCHRONOUS CHANGES IN GROWTH OF NORTH SEA FISHES», ALAN R. BAUDRON ET AL. EN *GLOBAL CHANGE BIOLOGY*, VOL. 20, N.º 4, ABRIL DE 2014; AMANDA MONTAÑEZ (*gráficos*); MAPPING SPECIALISTS (*mapa*)

evolutivo hoy adscrito a la Universidad de Liverpool, publicó en 2012 con sus colaboradores un análisis conjunto de experimentos sobre la maduración y la temperatura que abarcaban 169 especies terrestres y acuáticas. En el 90 por ciento de ellas hallaron que cuanto mayor era la temperatura, más pequeños eran los adultos. «Es un fenómeno tremendamente extendido», destaca Hirst.

La edad de maduración está fuertemente ligada al metabolismo, que aumenta en paralelo con el termómetro. El metabolismo es un conjunto de reacciones químicas y «estas se aceleran cuando sube la temperatura», explica Vanessa Messmer, bióloga marina de la Universidad James Cook de Queensland. En experimentos recientes, ella y sus colaboradores han analizado el efecto de las variaciones de temperatura sobre el metabolismo de varios peces coralinos de diversa talla. Los resultados, publicados en 2017 en *Global Change Biology*, revelan que en una especie de pez la tasa metabólica máxima puede llegar a dispararse hasta 44 veces cuando la temperatura del agua asciende de 28,5 a 33 °C. Los ensayos también evidencian que los peces pequeños regulan mejor su metabolismo a temperaturas altas que los más grandes, lo cual supondría una ventaja de cara a la supervivencia.

La aceleración del metabolismo demanda más alimento, por lo que si uno no logra obtenerlo, se verá forzado a escoger entre destinar sus magros recursos al crecimiento o a la procreación. La reproducción suele ganar la partida —pues en definitiva asegura la continuidad de la especie—, lo que significa que los animales maduran y se reproducen antes de haber alcanzado sus dimensiones habituales. Con el cambio climático, además, el calor a veces es demasiado intenso como para comer. Las temperaturas superiores a 15-20 °C provocan tal malestar en las cabras alpinas que dedican menos tiempo al forrajeo. Por su parte, las aves jadean para eliminar el exceso de calor, lo que dificulta el acto de comer. «La búsqueda de alimento no es tan eficiente y la energía invertida en refrigerar el cuerpo es mayor que la que se obtiene comiendo; por ello, los adultos que no están en plena forma y que, además, pierden peso podrían engendrar crías más chicas», señala Gardner.

En anfibios como las salamandras, se ha constatado que la pérdida de tamaño puede ser heredada por las nuevas generaciones. «Supongamos que las temperaturas suben en una zona de los montes Apalaches», plantea Karen Lips, investigadora medioambiental de la Universidad de Maryland en College Park. «La temperatura de las salamandras que viven en esa zona se elevará también, así como su tasa metabólica y la necesidad de comer más para mantener el mismo tamaño. Si no consiguen el alimento suficiente en esas nuevas condiciones climáticas, perderán peso. También sabemos por muchos estudios que los anfibios más chicos engendran menos crías, o si mantienen el mismo número, son más pequeñas. Así que, con el tiempo, si el ambiente es más caluroso, o bien se volverán más pequeños, o bien serán menos abundantes.»



MÁS CALOR, MENOS TAMAÑO: el diente grande (*izquierda*) pertenece a un équido del género *Arenahippus* y tiene unos 53,8 millones de años de antigüedad. El pequeño (*derecha*) pertenece a otro congénere que vivió 100.000 años más tarde, tras el brusco aumento de las temperaturas.

¿Y si no fuera el calor? En el caso de algunos animales cuyas dimensiones van a la baja también existe una razón de competencia y es que, sencillamente, el ser humano está pescando los ejemplares de mayor talla. Capturar a la mayoría de los peces grandes también podría privar a la especie de los genes que le confieren ese tamaño, por lo que los genes que perduran serían los de los supervivientes, es decir, los menudos. «Al pescar a los más grandes, el ser humano puede estar ejerciendo una presión evolutiva que favorezca la aparición de individuos más pequeños», explica Alan R. Baudron, investigador medioambiental de la Universidad de Aberdeen.

De todos modos, Baudron puntualiza que la teoría de la sobrepesca adolece de ciertas lagunas. En un artículo publicado en 2014 en *Global Change Biology*, él y sus colaboradores demostraron que, desde 1970 y a lo largo de 39 años, especies del mar del Norte tan diversas como el eglefino (pariente del bacalao), el arenque o la solla han experimentado una disminución de la talla. Las tres estuvieron sometidas a una fuerte presión pesquera en distintos momentos de ese período. El eglefino, por ejemplo, la sufrió durante los años setenta y ochenta del siglo xx, mientras que la solla también estuvo en el ojo de las flotas pesqueras en los noventa. Sin embargo, la reducción del tamaño no sigue esos episodios de sobrepesca, un efecto escalonado que cabría detectar si la pesca excesiva de una población concreta motivara la aparición de peces de tamaño menor. En su lugar, la reducción de la talla de ambas especies se produce más bien a la par que el aumento de la temperatura del agua. De las 13 poblaciones piscícolas analizadas por Baudron, nueve siguieron esa tónica. «Si es posible detectar una tendencia común en la evolución del tamaño de todas las especies, tal como hicimos, lo más probable es que se deba a ese factor compartido (la temperatura) y no a la presión pesquera soportada por cada especie», destaca Baudron. Es posible que la pesca tenga algo que ver en todo esto, pero no es el factor determinante, sentencia el investigador. Se barajan otras causas para este fenómeno de enanismo incipiente que corre paralelo con el calentamiento planetario; muchas —como los cambios metabólicos— están vinculadas con el aporte de energía y su uso. Puede que el alimento sea más escaso. Los inviernos cálidos en los polos tal vez favorezcan la supervivencia de los más chicos. Si como parece, los episodios de sequía se tornan más habituales, el empequeñecimiento de los anfibios podría estar encaminado a evitar la deshidratación.

Una ristra de motivos podría ser la mejor explicación de por qué las especies están encogiendo a ritmos distintos. Algunas no están experimentando cambio alguno, mientras que otras incluso están creciendo, así ha ocurrido con algunas aves migratorias en EE.UU., por ejemplo. «Son tantísimos los aspectos que están cambiando al mismo tiempo, que resulta difícil predecir cuál va a ser la respuesta de cada especie», reflexiona Jennifer A. Sheridan, investigadora medioambiental adscrita al Yale-NUS College de Singapur y autora principal de una revisión sobre la disminución del tamaño corporal. Es posible que así a algunas especies les resulte más fácil hallar el sustento que satisfaga su mayor demanda metabólica, argumenta. En otras, el aumento en curso de la temperatura tal vez no baste aún para desatar cambios metabólicos.

En todo caso, la reducción de las dimensiones verificada hasta ahora preocupa a muchos científicos. Un artículo de 2013 publicado en *Nature Climate Change* concluyó que, de seguir la tendencia observada en los peces, la media del peso máximo de varias especies podría descender en 2050 entre un 14 y 24 por ciento a escala mundial. Entre otras cosas, esto significaría menos pescado para una humanidad que no cesa de crecer. Algunos objetaron en su día que el modelo del estudio sobrestimaba en parte la velocidad del cambio de tamaño, mientras que otros defendieron su validez. Baudron sostiene que, en cualquier caso, la investigación «nos da una idea de la magnitud del problema». En algunas especies, la tendencia al enanismo podría acabar provocando su extinción; ser pequeño tal vez confiera cierta ventaja en un clima que se va calentando poco a poco, pero dificulta sobrevivir a ciertas condiciones climáticas extremas. Por último, no hay que olvidar que el equilibrio ecológico puede romperse si depredadores y presas no van a la par en este proceso. «Es posible que surjan desajustes entre una especie que mengüe muchísimo y otra que no lo haga tanto», advierte Hirst.

Los fósiles nos revelan que el enanismo no es irreversible. Si la temperatura descendiese, la fauna crecería de nuevo. Con las predicciones del cambio climático en la mano, es improbable que la humanidad sea testigo de ello. IyC

PARA SABER MÁS

Shrinking body size as an ecological response to climate change. Jennifer A. Sheridan y David Bickford en *Nature Climate Change*, vol. 1, págs. 401-406, noviembre de 2011.

Evolution of the earliest horses driven by climate change in the Paleocene-Eocene Thermal Maximum. Ross Secord et al. en *Science*, vol. 335, págs. 959-962, 24 de febrero de 2012.

Shrinking of fishes exacerbates impacts of global ocean changes on marine ecosystems. William W. L. Cheung et al. en *Nature Climate Change*, vol. 3, págs. 254-258, marzo de 2013.

Warming temperatures and smaller body sizes: Synchronous changes in growth of North sea fishes. Alan R. Baudron et al. en *Global Change Biology*, vol. 20, n.º 4, págs. 1023-1031, abril de 2014.

Principles of thermal ecology: Temperature, energy and life. Andrew Clarke. Oxford University Press, 2017.

Repetitive mammalian dwarfing during ancient greenhouse warming events. Abigail R. D'Ambrosia et al. en *Science Advances*, vol. 3, n.º 3, art. n.º e1601430, marzo de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Océanos más cálidos y huracanes más fuertes. Kevin E. Trenberth en *IyC*, septiembre de 2007.

GRACE DELGADO

ECOLOGÍA

LAS TERMITAS Y LOS ANILLOS DE HADAS

La relación mutua que mantienen las termitas y la vegetación explica unas misteriosas formaciones dispersas por todo el mundo

Lisa Margonelli

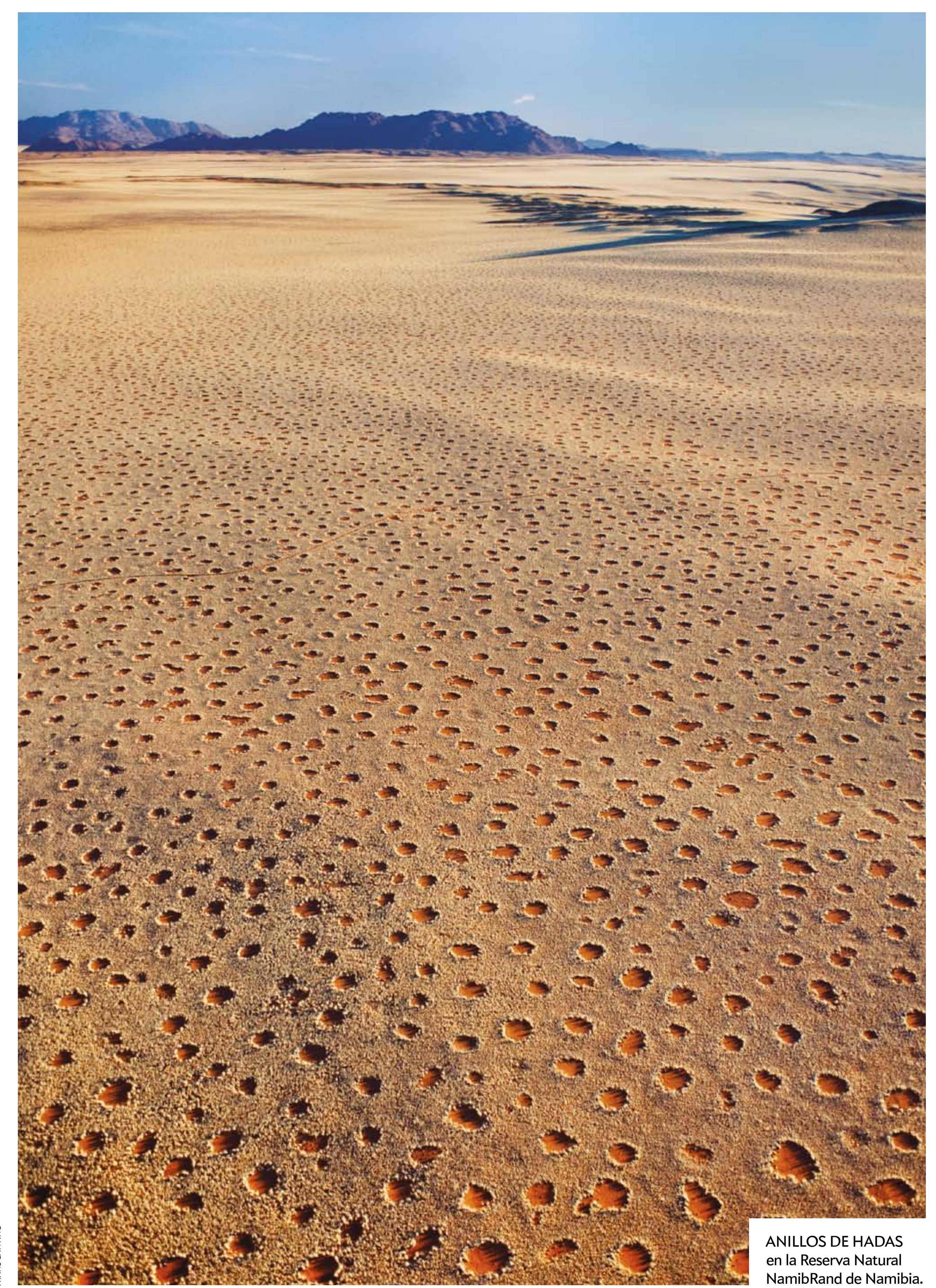


MI REGRESO DE UN VIAJE A AUSTRALIA, LE ESTUVE DANDO VUELTAS A UNA NOTICIA QUE había llegado a mis oídos sobre una gran mina de bauxita donde las termitas habían regenerado la tierra. Me pregunté si había algo más que el mero hecho de que hubieran fertilizado el suelo y compostado la hierba. Me daba la impresión de que debía de haber algo más entre el nacimiento de todo un bosque y el que unos insectos excretasen un puñado de moléculas de nitrógeno con sus heces. ¿Qué hacían allí abajo? Empecé a indagar en mis archivos y a buscar gente que trabajara en ecología del paisaje.

Esto me condujo al trabajo de una matemática y de un ecólogo: Corina Tarnita y Rob Pringle. Cuando me puse en contacto con la primera, esta acababa de trasladarse a Harvard desde Princeton y, junto con el segundo, había empezado a aplicar modelos matemáticos al estudio de la actividad de los termes en las tierras áridas de Kenia. Daba la casualidad de que había entrevistado a Rob en 2010, cuando con su equipo había publicado un artículo sobre el papel de estos insectos sociales en los ecosistemas de la sabana africana que albergan a elefantes y jirafas.

A comienzos de 2014, viajé en tren a Princeton para entrevistarme con ellos. Por aquel entonces, hacía seis años que me interesaban las termitas y me había dado por vencida con un par de ideas que me motivaron de buen principio: comprender la relación entre los cambios locales y los efectos globales —ese concepto holístico que persigue a los teóricos de la complejidad— y el desarrollo de una técnica que pudiera «salvar al mundo». Mediante modelos matemáticos, Corina y Rob, junto con sus equipos, presentaban finalmente una versión de ambas ideas. Y, además, estaban muy cerca de resolver el misterio de los anillos de hadas.

Corina estaba dando clase cuando llegué al campus —una mezcolanza de viejos edificios de ladrillo desgastado por el tiempo y construcciones futuristas de vidrio y ladrillo relucientes—, por lo que acudí a la cita con Rob. Años atrás, cuando conversé con él por teléfono, había escogido los gecos para estudiar los ecosistemas. Tras delimitar una zona en el mapa, la había dividido en cuadrículas y, sobre el terreno, había hecho un censo de ellos, como especie índice. Si había gecos, había insectos, y si había insectos, había plantas, y si había plantas, había algo de agua. De hecho, los lugares provistos de vegetación suficiente para atraer a multitud de gecos también eran los favoritos de los elefantes. Y estos eran, en el fondo, la razón de ser de esos estudios: todo el mundo quiere más elefantes.



FRANS LANTING

ANILLOS DE HADAS en la Reserva Natural NamibRand de Namibia.

En la sabana semiárida de Kenia, Rob había contabilizado entre 300 y 1100 gecos en sus parcelas, pero había dos lugares donde abundaban sobremanera: los corrales de ganado abandonados, repletos de estiércol, y los termiteros. En el primer caso no había sombra de duda —el estiércol es un fertilizante, por lo que la vegetación lozana atraía a los insectos—, pero la relación entre los reptiles y los termiteros distaba de estar clara.

En esta parte de Kenia, los termes cultivadores de hongos del género *Odontotermes* construyen la mayor parte del nido bajo el suelo (hipogeo), por lo que sus hogares no recuerdan a los altos montículos de tierra (epigeos) visibles en otras partes del continente, sino que confieren al terreno el aspecto de estar sufriendo un ataque de varicela, pues cada nido se halla equidistante de los demás, a entre 15 y 30 metros. Cuanto más se acercaba al centro de un montículo, más gecos encontraba Rob. Así pues, se dedicó a observar la vegetación herbácea y las acacias y halló una pauta similar. Era como si los termes lo hubieran organizado todo desde el subsuelo y hubiesen convertido el terreno en un gran tablero de fertilidad. «Las termitas lo controlan todo involuntariamente sin salir a la superficie», me había dicho cuando lo llamé en 2010.

La actividad de estos insectos tenía algo que ver, por lo menos en parte, con los nutrientes: Dan Doak, Kena Fox-Dobbs y otros hallaron que el suelo de los montículos contenía mucho más nitrógeno y fósforo que el situado fuera de ellos, por lo que los árboles y las plantas no solo eran más abundantes, sino que sus hojas también contenían más nitrógeno, lo cual las hacía más nutritivas, y posiblemente más sabrosas, para los herbívoros. Las termitas también movían las partículas de arena, razón por la cual el agua mostraba un comportamiento distinto sobre sus nidos. Le pregunté a Rob si «labraban» la tierra para cosechar más hierba, como sustento. Me dijo que, si bien era evidente que cuidaban sus hongos bajo tierra, no se conocían con certeza los pormenores de lo que sucedía a ras de suelo. Podría ser una serie de bucles de retroalimentación, cuyo resultado sería mayor que el de cada uno por separado. Parte del impacto radicaba en que el suelo en torno a los montículos retenía el agua de manera distinta, pero no estaba claro cómo exactamente. «Las termitas son determinantes en la regulación del flujo del agua. Son una caja negra.»

Cuando le escuché por primera vez hablar de la caja negra, lo entendí como una metáfora más que como un concepto de ingeniería. Ahora, cuando repaso mis notas de entonces, me pregunto qué quiso decir: ¿confiaba de veras en la ingeniería para responder a una cuestión ecológica? ¿O empleaba la expresión en sentido metafórico?

Con lo que Rob se devanaba los sesos era con las formaciones que las termitas creaban en la tierra. Se diría que formaban un entramado que convertía lo que de otro modo sería una planicie uniforme en una serie de «puntos calientes». Algo sucedía con la organización del espacio, que hacía que todo el sistema resultara más productivo. Y con la aparición de las técnicas de captación remota de imágenes, como el lídar (acrónimo de *laser imaging detection and ranging*), que se sirve del láser para crear imágenes del terreno, esos patrones aparecían por doquier. Averiguar la cantidad, que no conocía, fastidiaba a Rob: «No siempre soy capaz de distinguir esos patrones cuando me subo a bordo de una avioneta u observo a través de Google Earth». Yo lo entendía, porque había visto patrones parecidos. Cuando estaba en Harvard, Rob había hecho partícipe a Corina de su latoso problema.

Conocía el peculiar sentido del absurdo de Rob, porque me topé con una foto suya en Internet en la que lucía un traje negro mientras bregaba con una cinta métrica junto a una valla electrificada. Durante nuestra cita en su despacho, vistió tejanos y botas de vaquero en mitad de aquellos viejos muros enladrillados de Princeton.

Corina volvió de clase ataviada con botas altas y un vestido espléndido, desenvuelta y glamurosa en las desangeladas salas de los profesores noveles. Pero bajo esa imagen se oculta una mente profundamente analítica: capta las cosas, las pasa por un prisma matemático y las ve de una manera totalmente nueva.

Nuestra protagonista creció en una granja de su Rumanía natal, donde muy pronto le fascinaron las matemáticas y ganó diversos premios antes de marcharse a Harvard para cursar una diplomatura. Allí comenzó el programa de máster en geometría multidimensional, pero a mitad de curso se pasó a la biomatemática, donde las cuestiones eran más tangibles y complejas.

Se interesó en cómo funciona la cooperación y, en 2010, publicó junto con el biomatemático Martin Nowak y el entomólogo E. O. Wilson, un extenso artículo en el que reexaminaba una teoría consolidada sobre la evolución de los insectos sociales. Pasó un año rehaciendo las matemáticas en las que se basa la teoría y descubrió que el mero hecho de relacionarse no es la clave del éxito de la cooperación. Cuando una hormiga reina concibe hijas para que guarden y cuiden a su prole, la supervivencia de las crías es mayor: la cooperación produce más congéneres.

En 2013, acompañó a Rob al Centro de Investigación Mpala, en Kenia. Allí, en lugar de elaborar modelos de competencia y cooperación en su ordenador, pudo trabajar realmente con los termes de nidos distintos y observar sus combates cuando los enfrentaba cara a cara. Al principio, todo el terreno llano y herboso que estudiaban parecía uniforme a la vista y le llevó tiempo reconocer dónde estaban los montículos de los nidos. Pero cuando se habituó a detectar aquel patrón, tuvo un presentimiento: «Sobre el terreno, te asaltan un millón de preguntas. Podía vislumbrar que había más patrones, no solo los de los termiteros. Los intuía, pero no acababa de verlos».

Una tarde, después de tres semanas de trabajo para solicitar una beca de la Fundación Nacional para las Ciencias, Corina y Rob salieron a dar un paseo. Atravesaron un herbazal quemado; solo quedaban las bases de los tallos chamuscados, sin hojas.



Lisa Margonelli es subdirectora de *Zócalo Public Square*, revista de ideas de la Universidad Estatal de Arizona. Con anterioridad, publicó otro libro: *Oil on the brain: petroleum's long, strange trip to your tank* (Random House, 2007).

EN SÍNTESIS

Los termes son artífices esenciales de la fertilidad de las praderas áridas. Sus montículos mantienen una vegetación nutritiva que atrae a una gran variedad de insectos, a gecos e incluso a los elefantes.

Rob Pringle y Corina Tarnita, de la Universidad de Princeton, recurren a las matemáticas para modelar la relevancia ecológica de estos insectos sociales, que inciden en los paisajes a gran escala, aumentan la resistencia a la sequía e intervienen en la creación de los anillos de hadas.

Corina creyó ver algo y se encaramó al techo del todoterreno. Entonces lo vio, entre las matas quemadas: dos patrones intercalados. Primero el patrón de lunares de los termiteros, y luego, le pareció ver otro de manchas de leopardo en la vegetación situada entre ellos.

Las manchas de leopardo invocan a la biomatemática, porque son una forma natural con una teoría detrás. Se parecen al patrón de Turing, un modelo teórico propuesto por primera vez en 1952 por el matemático británico Alan Turing, cuya existencia se ha verificado con posterioridad en sistemas naturales. Si uno ha visto leopardos, peces cebra, cebras que no son peces, moluscos y camaleones, ha visto esos patrones, en ocasiones llamados de reacción-difusión o dependientes de la escala. Son componentes esenciales de la organización del mundo, que influyen en todo, desde la acumulación del sarro y la suciedad en el desagüe del fregadero hasta cómo percibe los olores el cerebro de un conejo.

Cuando Corina le dijo a Rob que había visto manchas de leopardo, él se mostró escéptico y respondió que solo se trataba de matas de hierba. Pero ella insistió y tomó algunas fotos. Más tarde, enviaron a unos estudiantes para que tomaran fotografías con una cámara instalada en un mástil de 10 metros. Cuando examinaron las imágenes, se hizo patente que en el terreno operaba otro patrón. Rob rectificó de inmediato. Simplemente, sabía demasiado sobre plantas para ver en verdad más allá de lo que sabía. «Es fantástico estar en el campo con Corina. No es ninguna sorpresa, pero no tenía las mismas ideas sobre competencia básica que yo».

A comienzos del siglo XX, el excéntrico naturalista Eugène Marais afirmó que necesitaríamos un «alfabeto nuevo» para ver a las termitas como son de veras. Tal vez tengamos ante nosotros ese alfabeto

Corina, por su parte, estaba encantada. «Antes de que Rob me trajera a África, era una bióloga teórica. Ahora, me cuesta mucho trabajar con sistemas que no pueda ver ni manipular. Es un gran cambio», me confesó.

Pero aquel instante tan solo marcaba el comienzo de la labor que el equipo tenía ante sí para construir un modelo, verificar una hipótesis y predecir cómo tales mecanismos de patrones interrelacionados se verían en la naturaleza. «Lo que precede al modelo es una intuición de lo que podrían ser las leyes que rigen los patrones», me dijo Corina más tarde. «Reúno todo esto en un bosquejo y luego incorporo una serie de detalles sobre cómo operan realmente las termitas y las plantas. Es como hacer de detective.»

En cooperación con Juan Bonachela, biólogo teórico experto en física estadística, y con Efrat Sheffer, biólogo que estudia la relación entre las plantas y sus ecosistemas a escala individual, Corina comenzó a construir un modelo, empezando por un esquema de cómo los termiteros organizan el paisaje: una simple malla hexagonal. Los termes que salen a recolectar alimento trazan un radio de búsqueda cada vez mayor, proceso que, con el paso de las décadas, a medida que el lugar se llena de montículos, hace que las zonas de forrajeo colinden. Cuando todos los termiteros acogen un número similar de ocupantes, acaban por espaciarse de manera uniforme por el lugar. Allí donde el radio de acción de las recolectoras de una colonia topa con el de las iguales de la colonia contigua, se crea un linde. No es un linde nítido, ni tampoco visible sobre el terreno. Pero, en cualquier caso, allí está, quien sabe si originado por la lucha feroz entre las ocupantes de ambos termiteros —como su alumna de posdoctorado Jessica Castillo-Vardaro había comprobado cuando las enfrentó— o quizá por termitas que evitan a las semejantes cuyo olor no es familiar. Si los nidos están repartidos uniformemente en el paisaje, la mayoría quedarán rodeados por otros seis, de modo que, al final, semejarán un mosaico de hexágonos, pues ello maximiza la distancia que separa a cada uno de los demás. Parece lógico: otros muchos animales se distribuyen en territorios hexagonales, como los lobos, los correlimos de Alaska o algunos peces.

Acto seguido, el equipo construyó un modelo del patrón de la vegetación. La idea básica de los modelos de Turing es que concurren dos mecanismos de retroalimentación. En las distancias cortas, el crecimiento se incentiva (activa) y en las largas, se desincentiva (inhibe). Por ejemplo, las plantas próximas entre sí colaboran para absorber mejor el agua de la lluvia y crear una pequeña mata, pero, con la distancia, las matas empiezan a competir por ella, cesan de crecer y dejan la tierra desnuda. En un modelo, si al activador y al inhibidor se les asignan cuatro parámetros (rapidez de la difusión, potencia, etc.) y se construye un modelo en el que todos ellos interactúen, con el tiempo formarán un conjunto característico de patrones. Los provistos de un activador potente formarán manchas grandes, mientras que los dotados de un inhibidor potente darán lugar a lunares pequeños. Sin embargo, si se trabaja al mismo tiempo con los parámetros por difusión, se obtendrán patrones más parecidos al caparazón de una tortuga, a un montón de rosquillas, a grietas o rayas, o a un laberinto. Esos patrones guardan un estrecho parecido con formaciones reales, como mejilloneras, arrecifes de coral o colonias de hongos. Así pues, los biólogos han especulado con que los activadores de ese tipo de retroalimentación dependiente de la escala podrían ser tan diversos como el agua, las hormonas o los organismos que colaboran entre sí; los inhibidores podrían ser la sequía, las hormonas o los depredadores.

Recurriendo a una mezcla de activadores e inhibidores adecuada para la vegetación de Kenia, Corina y Juan elaboraron un modelo matemático que creó patrones de retroalimentación dependientes de la escala. Al trabajar solo con los parámetros de la vegetación herbácea, pudieron limitar el aporte de agua y pasar de herbazales densos a un laberinto de matas dispersas y, de ahí, finalmente al desierto, todo con un gran parecido a las fotos. «Nos dijimos: 'Bien, hay más que suficiente difusión de la reacción'», comentó Corina sobre los patrones vegetales. «'¿Podemos acoplarlo a los patrones de las termitas?'». Combinó los termiteros autoorganizados y el modelo de retroalimentación dependiente de la escala aplicado a la vegetación. Ahora, en lugar de hallar por separado un patrón uniforme de termiteros, como lunares en medio de hexágonos, o un patrón de la vegetación en manchas de leopardo, este segundo patrón aparecía superpuesto ordenadamente sobre los hexágonos: hierba abundante sobre el centro del montículo, rico en recursos, y escasa en los bordes del nido. Corina imprimió imágenes de los dos modelos interrelacionados, con distintas cantidades de lluvia, y se las enseñó a Rob. En términos muy generales, las imágenes se

parecían a un tejido estampado africano: grandes manchas regularmente espaciadas, rodeadas de halos con un patrón de fondo parecido al calicó. Los lunares eran los montículos y el calicó correspondía al patrón de piel de leopardo de la vegetación. Cuando Corina y Rob compararon los modelos con las imágenes captadas por satélite de los parajes dominados por las termitas en África, corroboraron su gran similitud. Incluso podían acercar la imagen sobre el calicó del modelo para observar las formas de las matas y comprobar su parecido con las visibles en sus fotografías. Antes, estos patrones no se veían a simple vista. «La coincidencia de las predicciones del modelo con los datos despejó todas mis dudas», dijo Rob.

Para Corina, lo emocionante fue descubrir que ambos patrones interactuaban y se influían mutuamente a varias escalas. Lo local se conectaba con lo global y hasta se descubría en los mapas obtenidos vía satélite. «Soy muy feliz cuando es posible probar los modelos y hallamos tanta concordancia», comentó con evidente alborozo.

Para mí, el modelo matemático del equipo de Corina explicaba la desconcertante sensación que había tenido al contemplar Namibia y Australia a vista de pájaro. La impresión de que casi podía ver el dibujo de una alfombra persa en el paisaje era correcta. Y ahora, que por fin podía observarlo realmente en las imágenes de su modelo, pensaba en cómo la intuición de Corina se había aunado con la potente matemática de los modelos para revelar algo inédito. A comienzos del siglo XX, el excéntrico naturalista Eugène Marais afirmó que necesitaríamos un «alfabeto nuevo» para ver a las termitas como son de veras. Tal vez tengamos ante nosotros ese alfabeto.

Pero ejecutar los dos modelos había permitido comprender más cosas, con implicaciones mucho mayores. Gracias al control de la lluvia caída sobre los montículos, Corina descubrió que, cuando la vegetación brotaba a los pies de un termitero, podía sobrevivir con un aporte exiguo de agua, mucho menos del previsto. En palabras llanas, los termiteros hacen que las plantas sean mucho más resistentes a la sequía.

Esta observación conlleva un beneficio práctico. Los biólogos habían utilizado patrones laberínticos y de manchas para predecir que algunos paisajes secos se expandían irregularmente justo antes de virar de manera catastrófica y quedar convertidos en desiertos, lo que constituye una gran amenaza en África y Australia. Desde mediados de la década del 2000, aquellos modelos teóricos predecían que, cuando estos sistemas áridos se vinieran abajo, no se secarían gradualmente, sino que pasarían de un patrón laberíntico de vegetación a uno de manchas y, luego, básicamente se despeñarían por un precipicio (la llamada transición crítica) hasta acabar desertificados. La recuperación sería muy difícil, si no imposible.

Pero cuando Corina reguló la lluvia en el modelo para generar el laberinto vegetal que podía preceder al colapso, observó que cuando el paraje albergaba termiteros, el derrumbe tenía lugar con suma lentitud. Esto significa que su presencia frenaba el avance del desierto, y si este se acababa imponiendo, había posibilidades de recuperación con el retorno de las lluvias. Mientras hubiera termes, la vegetación brotaría primero sobre el termitero y más tarde en patrones característicos. Así pues, estos insectos aparentemente consolidan todo su entorno, además de dotar de cobijo a los lagartos y de alimento a los paquidermos. Y con el avance de los terrenos áridos, que ya cubren cerca del 40 por ciento del globo, y la redistribución de la lluvia que trae consigo el cambio climático, los termes podrían salvar realmente el planeta.



TERMITA SOLDADO de la especie *Odontotermes montanus* sobre material extraído de su termitero. Se observa el hongo blanco que la termita cultiva como alimento.

ROBERT M. PRINGLE, UNIVERSIDAD DE PRINCETON

El modelo era hermoso, pero los modelos solo son un símil del mundo. El paso siguiente era seguir sometiendo a prueba sus predicciones con experimentos de campo en Kenia. Aportando una cantidad adicional de lluvia a algunos termiteros y a sus inmediaciones, e impidiendo que cayera sobre otros, Rob, Corina y su equipo esperaban ver si los patrones de vegetación cambiarían en consonancia con las predicciones del modelo. Pero antes, había que dar con la forma de hacerlo. Kelly Caylor y Adam Wolf, becarios de Princeton, hacían algo parecido en Pine Barrens, una amplia zona forestal, por lo demás suburbana, de Nueva Jersey y me invitaron a visitar sus instalaciones.

Corría un frío día de noviembre y el lugar era merecedor de su nombre: kilómetros y kilómetros de altos pinos, ralos con un sotobosque despejado a sus pies. En el bosque, los investigadores habían construido unos pequeños y esmerados cobertizos de dos por cuatro para impedir que la lluvia cayera sobre algunas parcelas, en tanto que otras recibían una cantidad adicional de agua. Bajo los pinos, dominaban la penumbra y el frío. Y yo, abrigada solo con un forro polar, procuraba conservar el calor encogiéndome.

Rob pensaba que los elefantes no acudirían, como lo hacen a las pequeñas casas que protegen los apetitosos oasis de hierba en la sabana seca. «Creo que son un riesgo fortuito generalizado, pero les atraerá mucho el agua.» Dudaba de que pudieran construir algo lo bastante sólido para mantenerlos a raya. Además, son astutos. Incluso las vallas eléctricas tendrían sus inconvenientes. «Si colocamos una valla de dos metros, jugarán y tontearán con ella, pero las jirafas irán directas hacia ella porque no prestan atención.» Resultaba curioso estar tiritando bajo aquella pineda de Nueva Jersey, mientras charlábamos sobre jirafas despistadas.

En el camino de regreso a Princeton, explicaron que habían mantenido charlas informales con colegas que dudaban de que los patrones fueran obra de las termitas. Rob opinaba que el escepticismo procedía, en parte, de personas que no estaban familiarizadas con los sistemas de autoorganización, que podrían pensar que esas formaciones ordenadas a gran escala implicaban la existencia de una «mente privilegiada.» Y algunos ecólogos

suponen que, si la competencia entre las colonias de termes es lo bastante fuerte para determinar esos patrones elaborados, es probable que empujen los recursos hacia el colapso. La idea de que puedan competir tanto como para crear patrones y, a la par, disminuir el riesgo de colapso del ecosistema resulta difícil de encajar», apuntó Rob.

De vuelta a su despacho, Corina me explicó que pretendía trabajar con su equipo en un modelo mucho más refinado, tanto en los aspectos ligados a los termes como a la vegetación, con el que saltar a la palestra más enconada del debate sobre los patrones: los anillos de hadas. Estas formaciones constituyen un misterio: círculos de tierra que se encuentran en el norte de Namibia y en Australia, rodeados por lo general de vegetación. En las fotos aéreas, parecen huellas de elefantes, sonrosadas, de tierra seca, espaciadas de manera regular, que miden, de lado a lado, entre 2,5 y 30 metros. El debate enfrenta a quienes las creen obra de los termes y a los que opinan que son patrones de la vegetación. Pese a ser objeto de estudio desde la década de 1970, el interés por ellos se desató entre 2012 y 2016, cuando apareció una pequeña avalancha de artículos en revistas científicas que atribuían su origen a una causa u otra. Corina pensaba que, con un modelo más exhaustivo, podría demostrar que los anillos de hadas son el resultado de la autoorganización de las termitas y la retroalimentación dependiente de la escala de los vegetales.

Sin embargo, su construcción no resultó sencilla. «El modelo te obliga a tener una norma para todo. No pueden quedar cabos sueltos», me dijo cuando hablamos a comienzos de 2015. «Te exige creer que no es posible de ninguna otra manera.» Las termitas trabajan sin cesar en su caja negra bajo tierra, de incógnito. Había leído mucho sobre ellas y hablaba o se escribía a diario con Juan, en Escocia, ya que su equipo elaboraba los aspectos informáticos del modelo. Corina confesó que era el modelo más complejo en el que había trabajado nunca, que planteaba incongruencias al pensar sobre la retroalimentación dependiente de la escala: la idea de que las plantas se beneficien de la cercanía mutua tiene sentido, pero ¿la competencia suprime realmente el crecimiento a gran escala? Otra cuestión es de qué modo los termes concentran los nutrientes en el espacio (por supuesto, acarrean la vegetación al nido), y, a la vez, digieren una parte en el intestino, como nitrógeno biodisponible. Se trataba de un enorme rompecabezas.

«Para mí, no se trata de los anillos de hadas», opinó Corina. Lo que quería era entender cómo pueden interactuar varios patrones a múltiples escalas. «Es fascinante que estos insectos, que forman parte de ecosistemas desordenados y complejos, creen patrones regulares.»

En 2017, el equipo, del que formaban parte Jennifer Guyton, Tyler Coverdale y Ryan Long, publicó un artículo en el que modelizaban el modo en que especies excavadoras como las termitas, las hormigas o los roedores, podían interactuar con las plantas para crear vastos patrones y formaciones por todo el planeta. La suma de las tierras habitadas por las termitas de África, Asia y Australia, y de los montículos de tierra y relieves del terreno similares, como los *murundus* de Brasil, los *mima* del noroeste del Pacífico y los *heuweltjies* de Sudáfrica, indica que son muchas las decenas de miles de kilómetros cuadrados que pueden haber sido reordenadas desde el subsuelo. Posiblemente, ningún genio lo hubiera logrado: solo un ejército de billones de cerebros diminutos podría haber emprendido semejante tarea.

Ahora que podía ver la relación entre los diminutos excavadores y el gran panorama de tierra visible desde el aire, sentía simpatía por los primeros exploradores que estudiaron los termiteros y solo vieron metáforas de la sociedad humana y la ratificación de los derechos de los reyes. Al mirar adentro, se habían olvidado de contemplar el equivalente terrestre de las esferas celestes.

En el montículo es posible observar todo el orden de la esfera terrestre o, en lenguaje más moderno, la evolución de lo local a lo global. En primer lugar, está el mundo microscópico del intestino de las termitas, que digiere los vegetales, y luego el mundo de las termitas, que excavan y mantienen en orden su grandiosa colonia social; a continuación, el mundo de las termitas y sus hongos, que se comunican en el termitero a través de oleadas de sustancias y vapor de agua; y luego, el mundo de las plantas y los gecos en la superficie. Muy por encima, ajena a todo eso, una jirafa mastica una hoja apetitosa. Y desde el aire, se hace evidente una alfombra ordenada de fertilidad y superfertilidad. Y sobre todos ellos, una atmósfera y un planeta.

Como las jirafas, los humanos ignoramos la vasta agitación de los mundos más pequeños y más extensos que no podemos ver ni abarcar. Humanizamos o abstraemos esas relaciones en conceptos endebles que resulten comprensibles: insectos aristocráticos, altruismo, competencia, primos, tipos malos y buenos. Pero esos comportamientos, junto con la capacidad de percepción y señalización que requieren, pueden ser los cimientos de la complejidad.

Durante algún tiempo, me recriminé pensamientos sobre el fracaso del ser humano en ver más allá de sí mismo en el vasto universo: ¡tenemos tan poca ambición! Pero leo un discurso sobre el problema de la escala en ecología, impartido por el ecólogo de Princeton Simon Levin y entonces me doy cuenta de que nosotros mismos somos objeto de ese experimento, y nuestra consciencia caprichosa forma parte de lo que nos hace humanos. Levin afirma que el mundo se debe estudiar en múltiples escalas de tamaño, tiempo y organización; no existe una escala «correcta». En realidad, la escala a la que vemos el mundo es producto de nuestra evolución y de cómo seguiremos evolucionando. «El observador impone un sesgo perceptivo, un filtro a través del cual contempla el sistema. Esto tiene un significado evolutivo fundamental, porque cada organismo es un 'observador' del entorno, y las adaptaciones al ciclo biológico, como la dispersión y el letargo, modifican la escala perceptiva de las especies y la variabilidad observada.» Para el ser humano, como para las termitas, esos límites de percepción del mundo son la verdadera esencia de lo que somos. IyC

PARA SABER MÁS

Spatial pattern enhances ecosystem functioning in an African savanna. Robert M. Pringle et al. en *PLOS Biology*, vol. 8, n.º 5, artículo e1000377, 2010.

Termite mounds can increase the robustness of dryland ecosystems to climatic change. Juan A. Bonachela et al. en *Science*, vol. 347, páginas 651–655, 2015.

A theoretical foundation for multi-scale regular vegetation patterns. Corina E. Tarnita et al. en *Nature*, vol. 541, páginas 398–401, 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Autoorganización de la vegetación en tierras áridas y semiáridas. Víctor Fairén Le Lay en *IyC*, agosto de 2007.

Las termitas, aliadas inesperadas contra la desertificación. Juan A. Bonachela en *IyC*, enero de 2016.

por Bartolo Luque



Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid, donde investiga en teoría de sistemas complejos. Su labor docente y divulgativa ha sido reconocida por uno de los premios de la Real Sociedad Española de Física y la Fundación BBVA 2017.

Números críticos autoorganizados

Un ejemplo en teoría de números que emula uno de los fenómenos más interesantes de la física de los sistemas complejos

La teoría de números ha sido tradicionalmente coto privado de los matemáticos. Sin embargo, cada vez son más frecuentes las incursiones de físicos pertrechados con las armas que les proporciona la mecánica estadística. En la columna de este mes les presentaré un ejemplo de esa caza furtiva en el que participé hace un tiempo junto con mis colegas del campo de sistemas complejos Lucas Lacasa, hoy en la Universidad Queen Mary de Londres, y Octavio Miramontes, de la Universidad Autónoma de México.

En numerosos sistemas físicos, al variar poco a poco alguno de sus parámetros, como la temperatura de un metal imantado, puede producirse un fuerte cambio cualitativo de sus propiedades macroscópicas, como la magnetización total. Cuando esto ocurre, decimos que ha tenido lugar una transición de fase. Los puntos en el espacio de parámetros (temperatura y magnetización, en este ejemplo) donde se producen dichas transiciones reciben el nombre de puntos críticos. Y, en general, hablamos de fenómenos críticos cuando nos referimos al comportamiento de un sistema en las cercanías de uno de tales puntos.

Sorprendentemente, en la naturaleza encontramos muchos ejemplos de sistemas que son capaces de situarse en esa estrecha franja al borde de las transiciones de fase. En particular, esto ocurre en numerosos sistemas vivos. Pero ¿cómo consigue un sistema complejo situarse por sí solo en la vecindad de un punto crítico?

En algunos casos, si se trata de sistemas adaptativos sometidos a presiones de selección, el sistema puede explorar el espacio de parámetros en busca de un punto en el que la adaptación sea óptima. Así ocurre, por ejemplo, con los virus de RNA. Pero en otros casos semejante argumento no tiene ni siquiera sentido. Por eso, la aparición a finales de los años ochenta del concepto de «criticalidad autoorganizada» gozó de una extraordinaria acogida. Lo que demostraba la criticalidad autoorganizada era la existencia de un mecanismo plausible para que un sistema acabase en la vecindad de un punto crítico por sí solo, sin que fuera necesario regular desde el exterior el valor de ningún parámetro.

Pilas de arena

La primera descripción de un sistema dinámico que exhibía criticalidad autoorganizada fue la pila de arena presentada en 1987 por Per Bak, Chao Tang y Kurt Wiesenfeld, también conocida como «modelo BTW», en honor a sus creadores. Desde su presentación, este ejemplo acabaría convirtiéndose en el paradigma ilustrativo del fenómeno de criticalidad autoorganizada. ¿Cómo funciona?

Al formar una pila de arena dejando caer granos poco a poco desde arriba, el montón resultante en forma de cono irá aumentando de manera paulatina su pendiente. Pero esa pendiente dejará decrecer en cierto momento: cuando la cantidad de granos añadida desde arriba quede compensada, en promedio, por la que cae desde los bordes en forma de avalanchas.

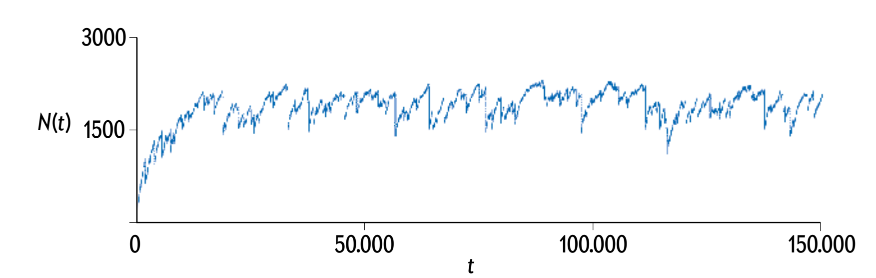
Es posible demostrar que en ese momento la pila se encuentra en estado crítico. Dicho estado actúa como atractor de la dinámica: una vez alcanzado, las pequeñas perturbaciones, como dejar caer un grano más, provocan avalanchas de granos de arena «libres de escala»; es decir, avalanchas en las que la probabilidad $P(s)$ de que se produzca una avalancha de s granos sigue una ley de potencias del tipo

$$P(s) \sim s^{-\tau} ,$$

donde, en los sistemas más habituales, τ suele ser un número comprendido entre 2 y 3.

Este tipo de leyes de potencias son características de todo sistema que se encuentra en un estado crítico. Decimos que su comportamiento es «libre de escala» porque no es posible asignar ningún tamaño típico a las fluctuaciones (las avalanchas, en este caso); al contrario de lo que ocurriría si, por ejemplo, la distribución tuviese la forma de una campana de Gauss. Una ley de potencias como la mostrada arriba implica que se producen avalanchas de todos los tamaños: unas pocas enormes (con s muy elevado) y muchas muy pequeñas (con s bajo).

Bak, Tang y Wiesenfeld presentaron el concepto de criticalidad autoorganizada como un posible mecanismo capaz



1. EVOLUCIÓN EN EL TIEMPO del número N de elementos de un conjunto primitivo de números naturales cuando se van introduciendo al azar elementos de un repositorio formado por los M = 10.000 primeros números naturales salvo la unidad. Tras un tiempo breve, el sistema alcanza un estado de equilibrio dinámico en torno a un valor crítico N_c próximo a 1800.

ADAPTADO DE: «NUMBER THEORETIC EXAMPLE OF SCALE-FREE TOPOLOGY INDUCING SELF-ORGANIZED CRITICALITY», BARTOLO LUQUE, OCTAVIO MIRAMONTES Y LUCAS LACASA EN *PHYSICAL REVIEW LETTERS*, VOL. 101, ART. 158702, OCTUBRE DE 2008 (*gráficas*)

de explicar que un sistema pudiese evolucionar de manera espontánea hasta alcanzar un estado crítico sin necesidad de un ajuste externo de sus parámetros. A partir de ese trabajo seminal —y de la decidida actitud de Per Bak— se generó una cantidad enorme de teoría, análisis de datos experimentales y modelos en múltiples áreas de la ciencia. Hoy no quedan dudas de que muchos fenómenos naturales exhiben criticalidad autoorganizada. Sin embargo, sigue sin existir una definición rigurosa de las condiciones bajo las cuales esperaríamos que este fenómeno se produjera.

Para cazar el mecanismo fundamental, los teóricos se han afanado en definir el modelo más simple posible que exhiba comportamiento crítico autoorganizado. En los años noventa, el físico Henrik Flyvbjerg introdujo una definición mínima de consenso: un sistema con criticalidad autoorganizada debe estar constituido por un *medio* a través del cual las *perturbaciones* pueden propagarse, y donde se alcanza un estado *invariante* (en sentido estadístico) en el que las respuestas son *críticas*.

En el caso de la pila de arena, el medio lo forman los granos depositados; las perturbaciones son los granos que dejamos caer; las respuestas a dichas perturbaciones son las avalanchas de granos que se deslizan por la pendiente, y el estado crítico se alcanza cuando la cantidad de granos en la pila permanece constante en sentido estadístico.

Pilas de números

Ahora intentemos llevar estas ideas al campo abstracto de la teoría de números. Para ello, consideremos el siguiente ejemplo.

Decimos que un conjunto de N números naturales es «primitivo» si sus elementos no pueden dividirse entre sí de manera exacta. Por ejemplo, el conjunto

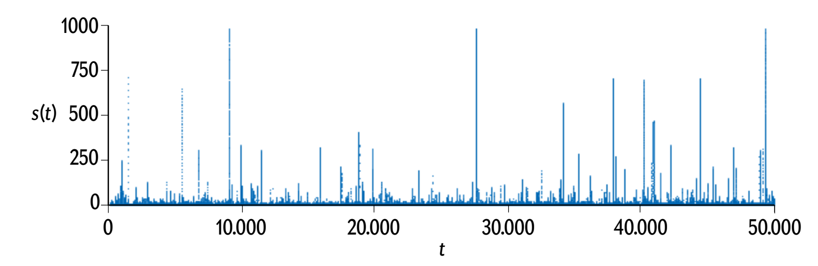
$$\{13, 23, 42, 59, 88, 90\}$$

es primitivo, como el lector puede comprobar al intentar dividir sin éxito todas las parejas posibles.

Consideremos ahora el conjunto ordenado de $M - 1$ números naturales dado por

$$\{2, 3, 4, \ldots, M\},$$

al que a partir de ahora llamaremos «repositorio». Supongamos que en el instante t nuestro conjunto primitivo es el antes citado, formado por $N(t) = 6$ elementos.



2. TAMAÑO DE LAS «AVALANCHAS» (números naturales que son expulsados del conjunto primitivo) en función del tiempo. La gráfica muestra que se producen avalanchas de tamaños muy dispares, con muchas pequeñas y unas pocas muy grandes.

A partir de estos sencillos ingredientes, vamos a intentar construir un modelo que exhiba criticalidad autoorganizada. Para ello, las reglas dinámicas serán las siguientes:

(R1) Perturbación: En el instante t, un número a se toma al azar del repositorio y se introduce en el conjunto primitivo.

En nuestro ejemplo, supongamos que el número en cuestión es $a = 3$.

(R2) Disipación: Si a divide a o es dividido por s elementos del conjunto primitivo, diremos que se produce una «avalancha» de tamaño s y los elementos correspondientes son devueltos al repositorio.

De esta manera, el conjunto resultante seguirá siendo primitivo, pero tendrá un nuevo tamaño dado por

$$N(t + 1) = N(t) + 1 - s\,.$$

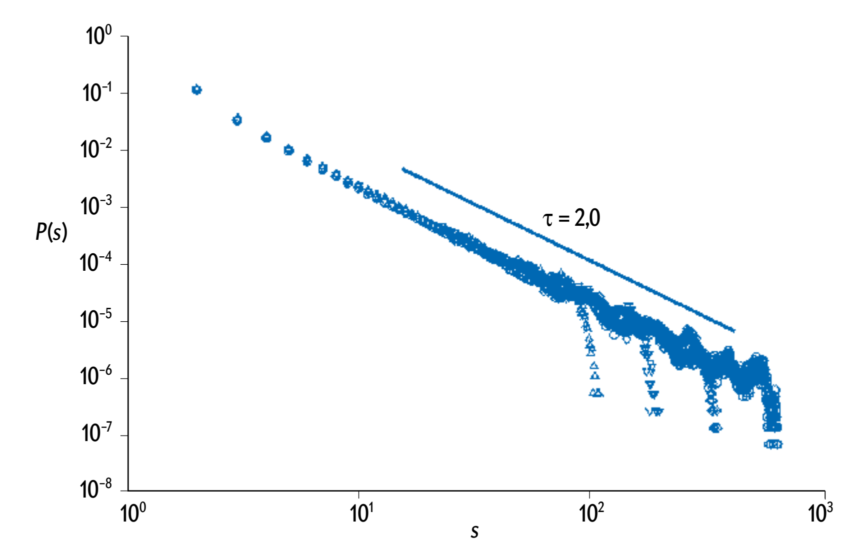
Volviendo a nuestro ejemplo, como 3 divide a los números 42 y 90, se produce una avalancha de tamaño $s = 2$ y el nuevo conjunto primitivo en el instante $t + 1$ estará constituido por $N(t + 1) = 6 + 1 - 2 = 5$ elementos:

$$\{3, 13, 23, 59, 88\}\,.$$

(R3) Se itera el proceso comenzando de nuevo en R1.

¿Mostrará criticalidad autoorganizada un sistema tan elemental? Para estudiarlo, podemos comenzar ejecutando varias simulaciones por ordenador. La figura 1 muestra cómo evoluciona el tamaño N de nuestro conjunto primitivo para $M = 10^4$ y $N(0) = 0$. Vemos que, después de un tiempo de transición, $N(t)$ acaba fluctuando alrededor de un valor N_c cercano a 1800.

Las fluctuaciones alrededor de dicho valor son el resultado de la perturbación producida en cada paso de tiempo por la



3. PROBABILIDAD $P(s)$ de que se produzca una avalancha de tamaño s para distintos tamaños del repositorio: $M = 2^{10}$ (*triangulos*), $M = 2^{11}$ (*triángulos invertidos*), $M = 2^{12}$ (*diamantes*) y $M = 2^{13}$ (*círculos*). Nótese que en ambos ejes la escala es logarítmica. Vemos que, en todos los casos, la distribución se ajusta bien a la ley de potencias $P(s) = s^{-2}$.

a b c

4. SISTEMA DE TEORÍA DE REDES inspirado en el ejemplo inicial con conjuntos primitivos. El sistema comienza con un conjunto de nodos «encendidos» (*rojo*) que carecen de enlaces entre sí (*a*). Después, se perturba activando un nodo (*azul*) escogido al azar (*b*). Por último, los nodos vecinos del nodo perturbado que estaban encendidos se apagan (*c*). Si la red total es libre de escala, estas tres sencillas reglas dinámicas conducen a un estado de criticalidad autoorganizada.

introducción en el conjunto primitivo de nuevos números extraídos del repositorio (la regla R1). A medida que transcurre el tiempo (según la regla R2), se producirán avalanchas causada por las divisiones, lo que implicará una modificación del tamaño y la composición del conjunto primitivo. Estas avalanchas constituyen la respuesta del sistema a las perturbaciones, y son las que mantienen el tamaño del conjunto primitivo en torno a N_c.

Comportamiento crítico

Vemos que nuestro sistema de números tiende de manera natural a un equilibrio estadístico. Una vez alcanzado ese equilibrio, ¿es crítico su comportamiento?

En la figura 2 hemos representado un ejemplo que muestra cómo evoluciona en el tiempo el tamaño $s(t)$ de las avalanchas que se producen. Por último, en la figura 3 se muestra la probabilidad $P(s)$ de que una avalancha sea de tamaño s para distintos valores de M. Vemos que, en todos los casos, la distribución de probabilidad sigue en líneas generales la siguiente ley:

$$P(s) \sim s^{-2} ,$$

una ley de potencias que nos indica que las respuestas a las perturbaciones son críticas. (Las «colas» que aparecen a la derecha y que se desvían de la ley de potencias se deben al tamaño finito del repositorio: cuanto mayor es M, más tarde surgen las colas. Para nuestro análisis, podemos prescindir de estos efectos.)

Así pues, podemos concluir, de acuerdo con la definición de Flyvbjerg, que nuestro sencillo modelo de división exhibe criticalidad autoorganizada. Las avalanchas de números conducen al sistema a estados de estabilidad, que no son otros que conjuntos primitivos de distintos tamaños y composiciones. Dado un repositorio de tamaño M, las fluctuaciones temporales son la expresión de una búsqueda estocástica en el espacio de configuraciones de los posibles conjuntos primitivos.

Como cabría esperar, la distribución del tamaño de las avalanchas, $P(s)$, sigue la misma ley que la distribución de divisores $D(n)$: la cantidad de números del repositorio que dividen a o son divididos por n. De hecho, es posible demostrar, tanto analíticamente como mediante simulaciones, que la cantidad de números del repositorio que tienen D divisores sigue una distribución dada por

$$P(D) = D^{-2} .$$

Ello se debe a que la avalancha que puede provocar la introducción de un número del repositorio es proporcional a la cantidad de números a los que este divide o son divididos por él.

Aunque aquí no entraremos en los detalles, merece la pena señalar que una ventaja de este sistema basado en teoría de números es que no tenemos por qué fiarnos exclusivamente de lo que nos dicen las simulaciones: el comportamiento cualitativo que acabamos de extraer puede demostrarse también de forma analítica.

De vuelta a los sistemas complejos

Parece difícil pensar en un modelo que exhiba criticalidad autoorganizada y que sea más sencillo que este. ¿Se le ocurre un modelo aún más simple? Pero, más allá del modelo de criticalidad autoorganizada mínimo posible, una cuestión teórica que continúa abierta, hemos conseguido un trofeo inesperado en nuestra cacería matemática.

Volviendo a la definición de criticalidad autoorganizada dada por Flyvbjerg, ¿qué hace de «medio» en este modelo de conjuntos primitivos? Tenemos a los números, pero ¿qué medio los sustenta? ¿Qué hace de equivalente al tablero que sustenta la pila de arena?

Observemos que el modelo de conjuntos primitivos puede entenderse como inmerso en un grafo, o una red, donde los nodos son los números y dos números se enlazan si y solo si son divisibles entre sí. Un conjunto primitivo constituye un subconjunto de nodos entre los que no existen enlaces, y dicho conjunto se modifica dinámicamente de acuerdo con las reglas del modelo.

El grado, la conectividad, del nodo n es $D(n)$. Y, en consecuencia, la distribución de conectividad en la red (la probabilidad de que un nodo dado tenga k enlaces) es

$$P(k) \sim k^{-2} .$$

Este tipo de redes son de enorme importancia en teoría de sistemas complejos. Se conocen como «redes libres de escala» y se caracterizan por la existencia de nodos con una amplia cantidad de enlaces: al igual que antes, unos pocos nodos tienen un gran número de enlaces, y muchos de ellos tienen muy pocos. Tales redes aparecen de manera natural en todo tipo de sistemas, desde las redes de relaciones sociales e Internet hasta las redes

de proteínas. Aquí, el comportamiento de criticalidad autoorganizada que emerge debido a las propiedades de divisibilidad entre números puede entenderse como una suerte de proceso de antipercolación sobre esta red libre de escala.

Pero hay más. Observemos que este modelo de conjuntos primitivos no es más que un caso particular de una clase de modelos críticos autoorganizados que se desconocían antes de nuestra incursión: redes con M nodos, cada uno de los cuales puede encontrarse en dos posibles estados, «encendido» o «apagado». En ellas tiene lugar la siguiente dinámica (*véase la figura 4*):

(R1) Perturbación: En cada paso de tiempo, un nodo apagado se escoge al azar y se activa.

(R2) Disipación: Los s vecinos del nodo perturbado que estaban activados se apagan. Decimos entonces que se ha producido una avalancha instantánea de tamaño s.

(R3) Se itera el proceso comenzando de nuevo en R1.

El equivalente a nuestro conjunto primitivo de N elementos es el conjunto de nodos encendidos. Con una red que no sea libre de escala, las fluctuaciones, o avalanchas, seguirán otro comportamiento. Sin embargo, cuando la red sea libre de escala, con una distribución de enlaces dada por una ley del tipo $P(k) \sim k^{-\gamma}$, las fluctuaciones seguirán una distribución de ley de potencias $P(s) \sim s^{-\tau}$ con $\tau = \gamma$, y la dinámica será de criticalidad autoorganizada.

Nuestro trofeo es un modelo extremadamente sencillo que muestra con claridad cómo la topología libre de escala de una red puede inducir criticalidad autoorganizada en la dinámica que sustenta.

PARA SABER MÁS

Self-organized criticality: An explanation of the 1/*f* noise. Per Bak, Chao Tang y Kurt Wiesenfeld en *Physical Review Letters*, vol. 59, págs. 381-384, julio de 1987.

Simplest possible self-organized critical system. Henrik Flyvbjerg en *Physical Review Letters*, vol. 76, págs. 940-943, febrero de 1996.

Number theoretic example of scale-free topology inducing self-organized criticality. Bartolo Luque, Octavio Miramontes y Lucas Lacasa en *Physical Review Letters*, vol. 101, art. 158702, octubre de 2008.

EN NUESTRO ARCHIVO

Criticalidad auto-organizada. Per Bak y Kan Chen en *IyC*, marzo de 1991.

Redes sin escala. Albert-László Barabási y Eric Bonabeu en *IyC*, julio de 2003.

SOLUCIONES A LOS 76 ACERTIJOS MATEMÁTICOS DE AGOSTO DE 2018

1902: Viaje a la Luna
1925: Mundo perdido
1927: Metrópolis
1931: Frankenstein
1933: King Kong
1951: Ultimátum a la Tierra
1953: La guerra de los mundos
1954: 20.000 leguas de viaje submarino
1956: Planeta prohibido
1957: El increíble hombre menguante
1959a: Dimensión desconocida
1959b: Viaje al centro de la Tierra
1959c: Plan 9 del espacio exterior
1960: La máquina del tiempo
1962: La naranja mecánica
1965: Alphaville
1966a: Star Treck
1966b: Fahrenheit 451
1968: 2001: Una odisea del espacio
1971: THX 1138
1973: Cuando el destino nos alcance
1975: Rollerball
1977: Star Wars
1978: Superman
1979: Alien, el octavo pasajero
1980: Un mundo feliz
1981a: Atmósfera cero
1981b: Heavy Metal
1982a: Tron
1982b: Blade Runner
1982c: La cosa
1984a: 1984
1984b: Terminator
1985a: E. T.
1985b: Brazil
1985c: Regreso al futuro
1987: Predator
1988a: Velocidad de escape
1988b: Pi, fe en el caos
1989: Batman
1993: Atrapado en el tiempo
1995: 12 monos
1996: Independence Day
1997a: El quinto elemento
1997b: Horizonte final / Horizonte de eventos
1997c: Cube
1997d: GATTACA
1997e: Contact
1997f: Abre los ojos
1998: Esfera
1999a: Nivel trece
1999b: eXistenZ
1999c: Matrix
2001a: Inteligencia artificial
2001b: El Señor de los Anillos
2002a: Señales
2002b: Cypher
2002c: Minority Reports
2003a: Matrix Revolutions
2003b: El núcleo
2004a: Primer
2004b: Yo, robot
2005: Guía del autoestopista galáctico
2006a: V de Vendetta
2006b: Zero Kelvin
2007: Transformers
2008: WALL-E
2009: Moon
2010a: Origen
2010b: The Walking Dead
2011a: Green Lantern
2011b: Código fuente
2013: Gravity
2014: Interstellar
2017: Power Rangers
2018: Han Solo

por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik



Jean-Michel Courty y **Édouard Kierlik** son profesores de física en la Universidad Pierre y Marie Curie de París.

Radiografías en color

¿Cómo distinguen los escáneres de los aeropuertos entre un líquido explosivo y un perfume?

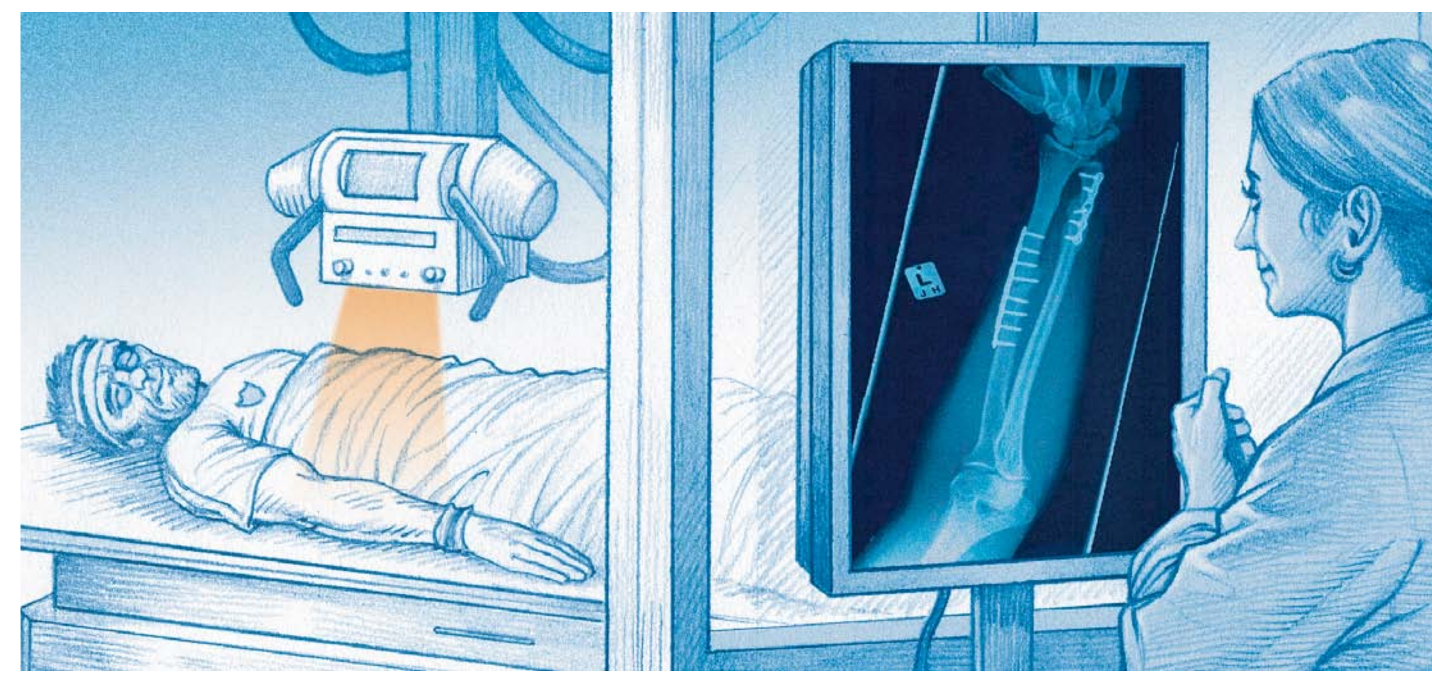
Las radiografías de rayos X tradicionales permiten ver con claridad una fractura de tibia, un diente cariado o el contorno de los objetos en el interior de una maleta. Sin embargo, cada vez resultan más insuficientes, sobre todo en el ámbito de la seguridad, donde en ocasiones es necesario distinguir un paquete de explosivo plástico de uno de mazapán. Por esa razón, se han desarrollado nuevos escáneres de rayos X capaces de revelar objetos que, a simple vista, pasarían disimulados. Para lograrlo, tales aparatos aprovechan con ingenio la interacción entre los rayos X y los átomos.

Para entender cómo funcionan, recordemos primero el fundamento de una radiografía tradicional. Estas pueden entenderse como una fotografía en negativo, donde las zonas claras corresponden a las partes del objeto que han absorbido los rayos X emitidos en dirección a la placa detectora (o que los han desviado hasta sacarlos fuera de campo). A igual espesor, esa absorción resulta tanto mayor cuanto más denso es el material; es decir, cuanto mayor es su masa por unidad de volumen. Este principio es el que permite distinguir con facilidad los huesos de otros tejidos, un diente cariado de uno sano, o, en el interior de una maleta, los objetos metálicos de las prendas de vestir.

¿Por qué se halla la absorción o la desviación de los rayos X tan directamente vinculada a la densidad del objeto? La razón obedece a que los rayos X interaccionan con los electrones del material, cuyo número por unidad de volumen es prácticamente proporcional a la densidad.

Justifiquemos esta última afirmación. La masa total de un átomo es esencialmente la del núcleo, la cual puede aproximarse por el número de nucleones (protones y neutrones) multiplicado por la masa del protón. Ahora bien, el número de nucleones en un átomo suele ser entre dos y tres veces el de protones, y el número de estos últimos es igual al de electrones, a fin de asegurar la neutralidad eléctrica del átomo. Por tanto, la cantidad de electrones presentes en un átomo será, *grosso modo*, proporcional a la masa de dicho átomo.

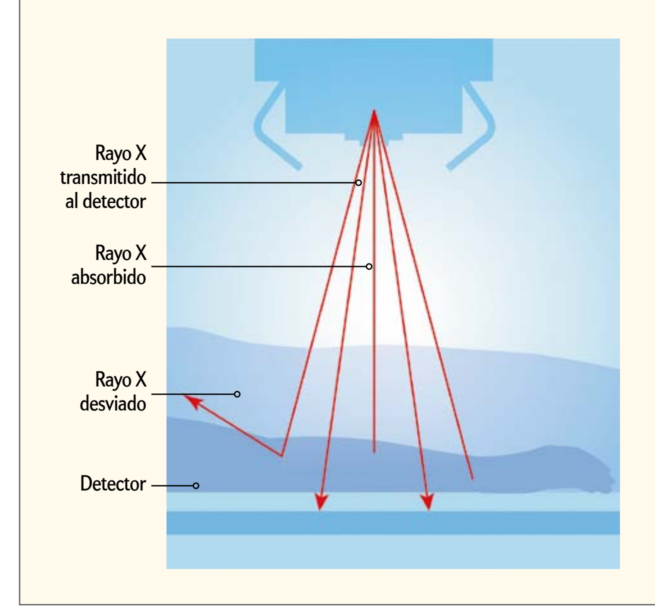
En una radiografía de rayos X tradicional se envía un haz de rayos X de energía bien definida a través del objeto examina-

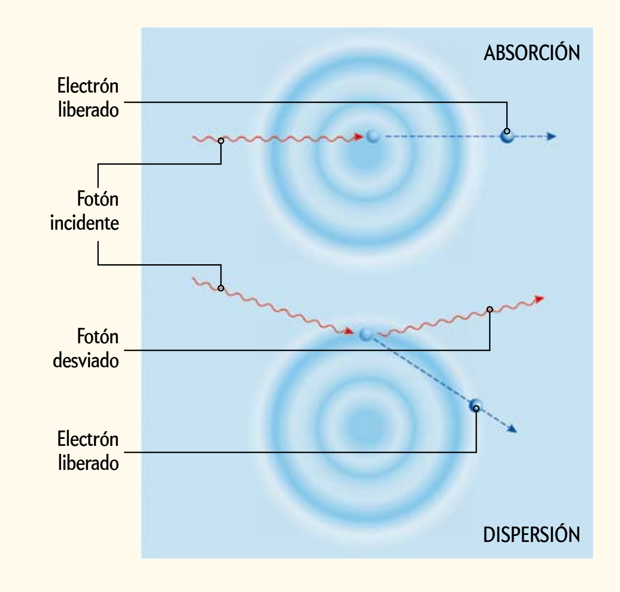


UNA RADIOGRAFÍA CLÁSICA visibiliza los contrastes de densidad: un tejido denso, como el hueso, deja pasar menos rayos X hacia la placa detectora que los tejidos ligeros, como el músculo.

¿ABSORCIÓN O DISPERSIÓN?

AL IMPACTAR CONTRA UN MATERIAL, los fotones de rayos X interaccionan básicamente con los electrones de sus átomos (casi no lo hacen con protones y neutrones, demasiado pesados). Esa interacción puede tener lugar de dos formas. En la primera de ellas, el fotón puede ser absorbido por un electrón situado en una capa profunda, el cual será entonces expulsado del átomo. Dicho proceso se conoce como «fotoionización». Sin embargo, el fotón también puede ser simplemente desviado por un electrón de las capas externas, proceso conocido como «dispersión Compton». La probabilidad de que ocurra uno u otro proceso depende de la energía del fotón incidente y de la energía de enlace que mantiene al electrón unido al átomo.





do. Se obtiene así una imagen en escala de grises: sombras que no aportan ninguna información sobre la naturaleza de los materiales irradiados. Los controladores de seguridad experimentados intentan reconocer el contorno de los objetos peligrosos, como un arma blanca o de fuego. Pero, cuando varios objetos se apilan, las sombras se superponen y estorban la identificación. Además, tales imágenes no permiten identificar explosivos o drogas, pues tales materiales no presentan ninguna forma particular. A lo sumo, un operador podrá identificar los cables eléctricos de un dispositivo detonador.

Colisiones fotón-electrón

Para entender cómo han podido mejorarse los controles de seguridad, volvamos a la interacción de los rayos X con la materia. Los rayos X son ondas electromagnéticas de muy corta longitud de onda, entre 0,001 y 10 nanómetros aproximadamente. Dependiendo de la frecuencia, los fotones asociados a esas ondas poseerán energías comprendidas entre las centenas y los cientos de miles de electronvoltios (eV). Tales energías son mucho mayores que las asociadas a la luz visible, del orden del electronvoltio.

En los escáneres de rayos X que consideraremos aquí, la energía de los fotones suele rondar los 100.000 eV, o 100 kiloelectronvoltios (keV). Un valor más que considerable comparado con la energía típica de enlace entre un electrón y el núcleo atómico, del orden de algunas decenas de eV.

Así pues, cabe pensar que el resultado de la interacción de un fotón X con el átomo será la ionización de este causada por la expulsión de uno de los electrones de su corteza. Y, de hecho, así ocurre. Sin embargo, podemos distinguir dos procesos, según el fotón X incidente solo se desvíe o sea absorbido por completo.

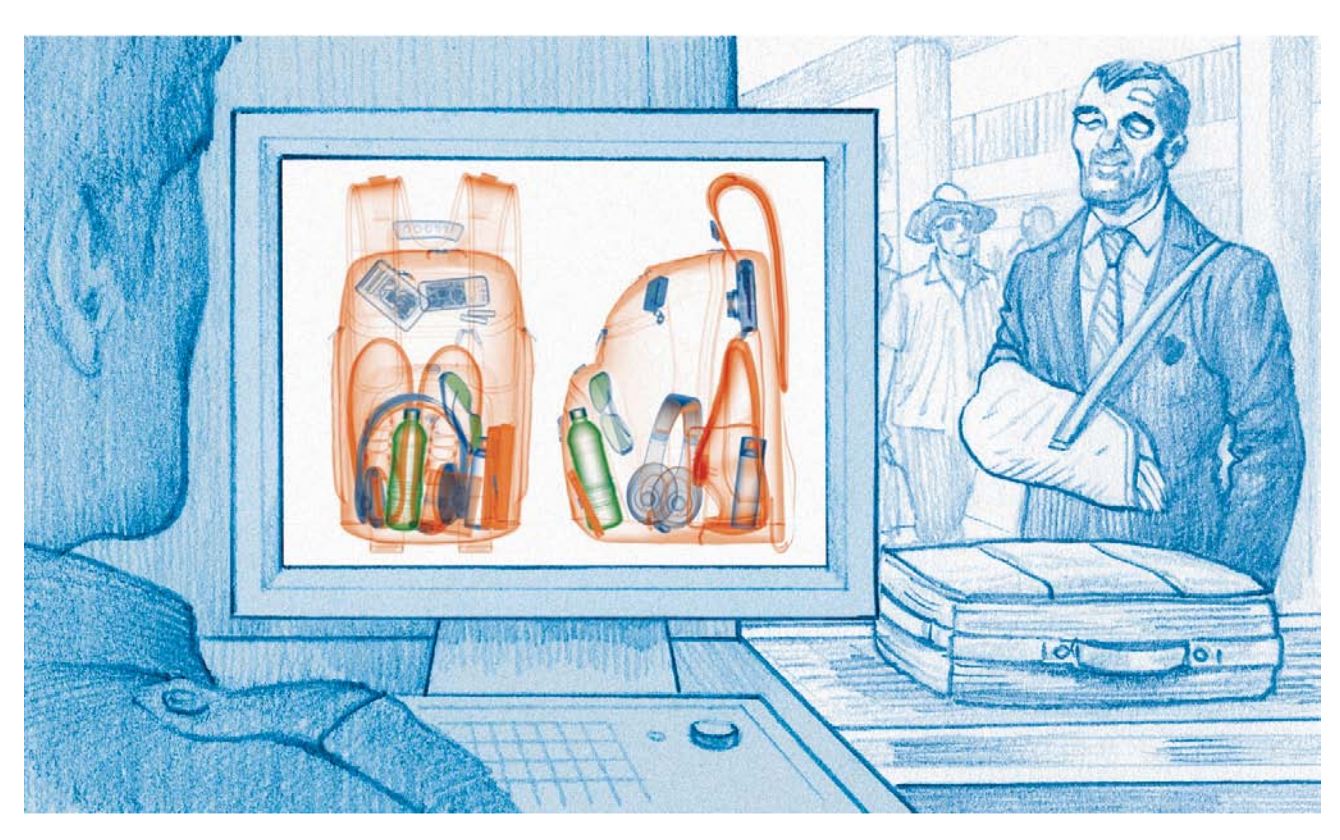
Para los electrones de las capas externas del átomo, la energía de un fotón X será muy superior a su energía de enlace. Por tanto, para ellos todo ocurre como si fueran electrones libres. En tal caso, el fotón X cede una pequeña parte de su energía y cantidad de movimiento al electrón: este último es expulsado del átomo, pero el fotón solo se desvía, sin llegar a ser absorbido. Se trata de la llamada «dispersión Compton», la cual se manifiesta por medio de una disminución de la intensidad del haz en su dirección de propagación, ya que una parte de la onda incidente acaba dispersándose en otras direcciones.

El segundo mecanismo es la fotoionización: el fotón X es absorbido y cede toda su energía al electrón. Este proceso afecta sobre todo a los electrones de las capas más profundas del átomo, para los que la energía de enlace asciende a varios keV, por lo que ya no puede despreciarse.

¿Cómo comparar ambos mecanismos? Para la dispersión Compton y para energías incidentes menores que la asociada a la masa del electrón (unos 500 keV), la probabilidad de que el fotón sea dispersado no depende de su energía: todo ocurre como si el electrón se comportase como una minúscula pantalla de 10^{-28} metros cuadrados.

En cambio, en el caso de la fotoionización, la probabilidad de absorción es máxima cuando la energía del fotón iguala a la energía de ionización del electrón. De hecho, una vez rebasada esa energía, la probabilidad de absorción disminuye con rapidez (de modo inversamente proporcional a la energía).

Así pues, en el orden de energías considerado, el índice de dispersión Compton es prácticamente constante. Ese efecto predomina en las energías altas. Pero a



CONTROLES PRECISOS: Al efectuar radiografías con rayos X de dos energías diferentes puede obtenerse el número atómico medio de la sustancia irradiada, lo que informa sobre su naturaleza. Las imágenes resultantes suelen colorear en naranja las sustancias de número atómico bajo. Estas incluyen los materiales orgánicos, entre los que se encuentran las drogas y los explosivos. Con los algoritmos adecuados, es incluso posible distinguir entre ambos. Ello se debe a que las moléculas de estupefacientes son ricas en carbono, oxígeno e hidrógeno, mientras que las de los explosivos contienen mucho más nitrógeno.

energías más bajas domina la fotoionización, cuya tasa depende fuertemente de la energía.

Energías diferentes, imágenes distintas

El paso de un régimen a otro depende de la naturaleza del átomo. La transición tiene lugar en torno a los 20 keV para elementos ligeros, como el carbono, pero a 130 keV para otros más pesados, como el cobre. Por tanto, si variamos la energía del haz, la imagen resultante cambiará en función de qué átomos se hallen presentes en el material.

Por esta razón, las inspecciones de seguridad se llevan a cabo con rayos X de distintas energías: se toman dos radiografías simultáneas (en ocasiones más) y se comparan. Las diferencias entre una imagen y otra remiten al número atómico medio (cantidad de protones en el átomo) del material examinado.

Después, esa información se presenta con distintos colores para distinguir tres grandes grupos de materiales: los elementos de bajo número atómico se marcan en naranja, grupo que incluye a la materia orgánica: alimentos y prendas de vestir (polímeros), pero también drogas y explosivos. En verde se colorean los elementos de número atómico medio, como el aluminio, y en azul los de número atómico elevado, como el cobre o el hierro. También se emplea una escala de claroscuros para visibilizar el grado de absorción; es decir, el espesor atravesado. Por último, para resolver en parte el problema de la superposición de las sombras, se toman dos imágenes en direcciones perpendiculares.

El proceso puede mejorarse aún más. Ciertos dispositivos detectan los rayos X que el objeto desvía hacia atrás (en dirección a la fuente), los cuales delatan la presencia de elementos ligeros y, por tanto, de sustancias orgánicas. En concreto, este es el caso de los escáneres corporales, los cuales deben minimizar la absorción de los rayos X.

Por último, puede hacerse también una tomografía; es decir, una toma de imágenes con ayuda de detectores que giran en torno al objeto, a fin de tomar planos desde todas direcciones, lo que permite reconstruir el contenido en tres dimensiones. En los aeropuertos, este tipo de escáner ya es obligatorio para controlar los equipajes que viajan en la bodega.

PARA SABER MÁS

Luggage and shipped goods. H. Vogel y D. Haller en *European Journal of Radiology*, vol. 63, n.º 2, págs. 242-253, agosto de 2007.

Dual-energy X-ray imaging: Benefits and limits. V. Rebuffel y J.-M. Dinten en *Insight – Non-Destructive Testing and Conditions Monitorig*, vol. 49, n.º 10, págs. 589-594, octubre de 2007.

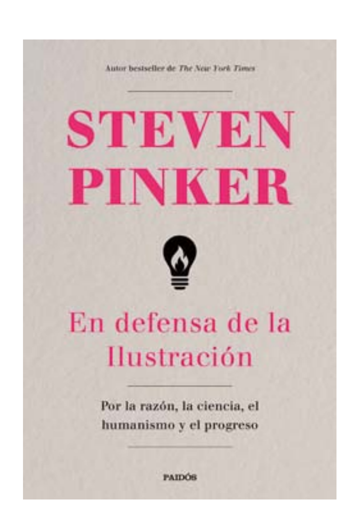
Imaging in airport security: Past, present, future and the link to forensic and clinical radiology. O. E. Wetter en *Journal of Forensic Radiology and Imaging*, vol. 1, n.º 4, págs. 152-160, octubre de 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

Radiografía digital. Mark Fischetti en *IyC*, julio de 2006.

Radiografías por contraste de fase. Charles Q. Choi en *IyC*, abril de 2012.

Nuevos detectores de rayos X. John A. Rowlands en *IyC*, abril de 2018.



EN DEFENSA DE LA ILUSTRACIÓN
POR LA RAZÓN, LA CIENCIA, EL HUMANISMO Y EL PROGRESO
Steven Pinker
Ediciones Paidós, 2018

Un mundo mejor de lo que pensábamos, pero con razones para la inquietud

Un documentado análisis para pensar con profundidad en el papel de la ciencia y la técnica en el mundo actual

El mundo va cada vez peor. Un creciente número de personas es víctima de injusticias sociales, económicas y políticas. La violencia y los conflictos armados están a la orden del día y su virulencia es aterradora. Los beneficios de la tecnología están muy mal repartidos, y solo los habitantes de los países más ricos, o las élites corruptas de los pobres, pueden decir que han visto su vida significativamente mejorada gracias a ellos. El desarrollo tecnológico está además orientado al control social y a un beneficio económico depredador, lo que prepara un futuro distópico. Todo progreso, en definitiva, es aparente y visto como tal solo desde una perspectiva concreta, frente a muchas otras desde las que no se apreciaría avance alguno, o desde las que podría contrapesarse con un retroceso equiparable. Creer en el progreso sin más, en un progreso continuo y generalizado, es ingenuo y complaciente con las injusticias y desigualdades que nos rodean.

Estas son ideas muy arraigadas en la opinión pública, en especial en los países occidentales, y son precisamente las ideas que el libro del psicólogo y lingüista de Harvard Steven Pinker, *En defensa de la Ilustración*, trata de desmontar. Emplea para ello un extenso arsenal de argumentos y de discusiones de casos, pero sobre todo una impresionante cantidad de datos obtenidos de fuentes fiables y representados en numerosas gráficas que dejan bien claro su significado. Es quizás esta recopilación de datos lo más valioso del libro y lo que más puede desarmar a sus críticos. El pesimismo circundante, según Pinker, es falso e infundado. De hecho, los ideales de la Ilustración, que él cifra en la razón, la ciencia, el humanismo y la confianza en el progreso, llevan tiempo construyendo una sociedad mucho mejor que la que teníamos antes del siglo XVIII en todas partes del mundo, por mucho que nos cueste reconocerlo.

Hay quien ha cuestionado que Pinker ofrezca una descripción correcta de lo que fue en realidad la Ilustración, pero creo que esa objeción yerra el tiro. No se trata de un libro de historia, sino de una reflexión sobre nuestro tiempo y sobre el impacto que ciertos valores e ideas han tenido en la historia reciente. Igualmente desencaminadas me parecen las acusaciones que ha recibido el libro de estar obnubilado con las estadísticas, mientras que es insensible ante el sufrimiento real de los individuos de carne y hueso, de no dar importancia a los beneficios de los valores «locales», los valores de las pequeñas comunidades, o de ser un alegato antiintelectualista.

Los lectores de su anterior obra, *Los ángeles que llevamos dentro*, verán en este una extensión y profundización de las tesis allí mantenidas acerca del progreso humano. No solo hemos disminuido la violencia, la hostilidad y la crueldad ejercida contra otros seres humanos, como allí documentaba Pinker, sino que durante los siglos XIX y XX hemos mejorado enormemente la esperanza de vida, la salud, el consumo de calorías por persona y la riqueza disponible, al tiempo que hemos reducido el porcentaje de personas en pobreza extrema, las hambrunas, el nivel de analfabetismo y las desigualdades entre naciones (aunque se haya producido un aumento de la desigualdad en el interior de algunos países, normalmente los más ricos).

Si los datos desmienten la opinión común, ¿por qué está tan extendida? La explicación de Pinker es que, debido a ciertos mecanismos psicológicos evolutivamente establecidos, no somos especialmente buenos estimando probabilidades de eventos y, además, le damos más importancia a los datos negativos que a los positivos, lo cual induce también a los medios de comunicación a centrarse en esos datos negativos, como si fueran los únicos relevantes. El pesimismo nos ha mantenido alerta, el optimismo no. Por otra parte, los académicos y los líderes de opinión deben ser pesimistas de oficio si no quieren parecer reaccionarios, o, al menos, faltos de compromiso.

Entre las críticas más atinadas que ha recibido el libro está la efectuada por Ian Goldin, de la Escuela Martin de Oxford, en las páginas de *Nature* en febrero de 2018. Goldin coincide con Pinker en la enorme importancia de los progresos realizados en los dos últimos siglos, principalmente en salud, riqueza, bienestar y educación. Pero señala el empeño de Pinker en minusvalorar los riesgos que se nos avecinan, para los que no parece haber soluciones tecnológicas fáciles. Riesgos como el deterioro ambiental y la sobreexplotación de los recursos naturales, el cambio climático, la pérdida de biodiversidad, el impacto de las nuevas tecnologías (particularmente la robótica y la inteligencia artificial) en el mercado laboral y en el control del mundo financiero, político y empresarial; el despliegue de armas inteligentes, la posibilidad de nuevas epidemias masivas, el auge del nacionalismo y del populismo xenófobo como reacción a la globalización, etcétera.

Solo la cuestión del cambio climático encierra, a juicio de los expertos, riesgos abrumadores, como la subida del nivel del mar y la consiguiente desaparición de ciudades densamente pobladas; o la disminución de la productividad de las cosechas, la acidificación de los océanos, la recurrencia de fenómenos climáticos extremos, la movilización de millones de refugiados ambientales y la inhabitabilidad, debido a las altas temperaturas o por falta de agua, de extensas zonas del planeta ahora pobladas.

Sin embargo, Pinker estima que estos riesgos no difieren cualitativamente de otros que hemos tenido que afrontar en el pasado y que finalmente no han frenado el progreso. Son problemas a resolver, no fatalidades inabordables. Claro que, incluso si aceptamos esto, la cuestión que Pinker soslaya es si estamos aún a tiempo de afrontarlos y si todos ellos van a poder ser manejados mediante procedimientos tecnológicos, mediante el uso de la razón

o a través de medidas de control social. Si estos riesgos no son atendidos adecuadamente —y hay evidencias que señalan que no lo estamos haciendo—, la perspectiva de un grave declive civilizatorio no es descartable.

Por supuesto, en ningún lugar del libro se afirma que el progreso esté siempre garantizado, que no haya períodos de retroceso, o que no podamos destruir todo aquello en lo que se ha fundamentado hasta ahora. Pero Pinker considera que los esfuerzos que se están realizando en la reducción de emisiones de CO_2 (China, la Unión Europea y Estados Unidos, los principales emisores, redujeron sus emisiones entre 2014 y 2015) marcan el camino correcto. Por otro lado, la mejora de las centrales nucleares, la aplicación de la geoingeniería y el avance en los conocimientos, que permitirá la fabricación de nuevas baterías, una mejor distribución de la energía y el desarrollo de métodos de captación y almacenamiento del CO_2, serán piezas clave en la mitigación del problema y quizás en su total eliminación. Por tanto, con la guía proporcionada por los ideales de la Ilustración arriba señalados, el resultado de nuestras acciones tecnológicas seguirá siendo tan positivo como en los últimos siglos.

Es este el punto en el que el «optimismo condicional» de Pinker reclama una mayor confianza por parte del lector, puesto que se da un salto desde los datos hacia lo que el futuro nos depara, y los argumentos para hacerlo no son lo suficientemente fuertes. No está claro, por ejemplo, si el progreso experimentado hasta ahora se debe fundamentalmente a la aplicación de esos ideales ilustrados o, como sostienen otros analistas, ha sido a costa de un consumo intensivo de los combustibles fósiles y de los recursos no renovables del planeta, lo que no puede sostenerse por mucho tiempo más sin graves consecuencias para las generaciones futuras. Si este fuera el caso, la confianza de Pinker en que las nuevas tecnologías y la geoingeniería van a ser la solución al cambio climático quedaría bastante comprometida.

Se ha dicho de este libro que es un panfleto político (así lo ha visto, por ejemplo, John Gray, en una de las reseñas más displicentes que ha recibido), que se trata de una defensa declarada del liberalismo y de una crítica simplista y sesgada de cualquier movimiento político o pensamiento filosófico que ponga en cuestión los ideales de la Ilustración, con Nietzsche como chivo expiatorio. Ciertamente, Pinker reconoce la intencionalidad política de sus tesis. Pero este es un motivo más para leerlo. No creo que nadie vaya a cambiar de ideología con su lectura ni que busque en sus páginas una introducción al pensamiento nietzscheano. En cambio, sus datos y argumentos proporcionan una buena base para pensar con profundidad en ciertas convicciones extendidas. En manos del lector queda no convertir lo que puede ser un antídoto contra la desesperanza en un narcótico para la complacencia.

—Antonio Diéguez
Departamento de Filosofía
Universidad de Málaga



FEAR, WONDER, AND SCIENCE IN THE NEW AGE OF THE REPRODUCTIVE BIOTECHNOLOGY
Scott Gilbert y Clara Pinto-Correia
Columbia University Press, 2017

De la embriología a la reproducción asistida

Principios básicos y avances técnicos en una de las áreas más fascinantes de la ciencia

Dos elementos sirven de punto de arranque para la ciencia: el sentimiento de admiración, de maravillarse ante lo observado, y la búsqueda de regularidades, aparentes o celadas, en los fenómenos que permitan ahormarlos en una teoría o modelo. A propósito de lo segundo, Alfred Nobel escribió que la observación y la búsqueda de semejanzas y diferencias constituyen la base de todo conocimiento humano. Por la admiración, afirmó Aristóteles, el hombre comenzó a filosofar. Esta idea volvió a aparecer en los albores de la ciencia moderna con Francis Bacon, para quien la admiración era la semilla del conocimiento.

Desde muy pronto el ser humano se esforzó en dar explicación a las observaciones mediante la interpretación de las regularidades advertidas o presumidas. Es arquertípico lo acontecido en astronomía: Ptolomeo ajustó las observaciones de los movimientos de las estrellas a un modelo geocéntrico del cosmos, con epiciclos complejos para justificar los movimientos retrógrados de los planetas. En el siglo XVI, Kepler analizó los datos de Copérnico y de Tycho Brahe y dedujo que los planetas trazaban movimientos elípticos, con el Sol en un foco de la elipse.

Pareja trayectoria siguió la embriología. El mundo del embrión despierta la admiración del científico ante el sorprendente proceso de desarrollo del organismo a partir de una sola célula. También evidencia la regularidad de una sucesión de pautas que se van manifestando con una precisión no menos llamativa. Cuando un óvulo es fecundado por un espermatozoide, los cromosomas del padre y de la madre se unen y comienza a desarrollarse un embrión genéticamente único.

Escrito a dos manos, *Fear, wonder, and science in the age of reproductive technology* conjuga el rigor técnico de la biología del desarrollo con el contrapunto humanista. Scott Gilbert describe la aventura del comienzo de la vida, la cooperación de espermatozoide y óvulo (dos células que, al borde del precipicio de la muerte, generan una nueva vida), el mutuo socorro de los órganos en su conformación, la aparición de gemelos y la génesis de las gónadas. Los capítulos de Clara Pinto Correia aportan el contrapunto humanista. Describe con puntillosa exactitud la escalonada introducción de técnicas de reproducción asistida, la celeridad con que estas se aceptaron y su difusión creciente. No carecen de sentido, pues a

veces el espermatozoide y el óvulo no se acoplan o el embrión muere.

La historia del embrión importa a todos los seres humanos. Seamos o no conscientes de ello, la forma en que se halla construido nuestro cuerpo escribe las primeras páginas de nuestra autobiografía. Pero son muchos los errores que la sociedad sigue cometiendo al imaginar el proceso. Se afirma, por ejemplo, que el espermatozoide más rápido es el que alcanza a fecundar el óvulo y que lo hace al perforarlo, o que la píldora del día después causa el aborto. Ninguno de esos enunciados es correcto. No pocos los toman como verdades científicas y creen que, como tales, han de admitirse.

El libro de Gilbert y Pinto-Correia busca salir al paso de tales falsedades. El cigoto, el embrión unicelular, no puede percibirse a simple vista, pero terminará midiendo 1,80 metros, con un corazón en el lado izquierdo, una boca y un ano en sus lugares debidos y dos ojos (y solo dos) en la cabeza que miran siempre de frente. La rodilla es una maravilla de músculos, tendones, ligamentos y lubricantes, cada uno de los cuales crece en su sitio correcto y se conecta con otros apropiados.

Lo que los científicos saben es que la fecundación humana es un proceso que implica hechos sorprendentes de cooperación entre las células. Primero, en esta competición no siempre triunfa el más rápido; el primer espermatozoide que alcanza el óvulo no suele ser el que lo fecunda, pues suele estar inmaduro. Segundo, el tracto reproductor no es pasivo. Las células de los oviductos (trompas de Falopio) se unen a los espermatozoides, frenan su velocidad y segregan proteínas que cambian las membranas celulares del gameto. Esos cambios en la membrana celular permiten la fusión del espermatozoide y del óvulo para generar el embrión unicelular (cigoto). Tercero, el espermatozoide no perfora, sino que se sitúa junto al óvulo en un punto de contacto donde las membranas celulares del óvulo y del espermatozoide se encuentran y dejan que los dos núcleos se instalen en una misma célula; espermatozoide y óvulo son ambos activos en ese proceso. Y cuarto, la fecundación se toma su tiempo. No se produce en el momento de la pasión, sino cuatro o cinco días después de la interacción sexual.

La reproducción sexual es una pieza maestra de la naturaleza. Constituye la base de la biodiversidad, de la variabilidad y de la continuidad de la vida. Combina dos de las fuerzas más poderosas: el sexo y la reproducción. Sexo significa la combinación de genes. Reproducir es crear nuevos organismos a partir de otros preexistentes. Unidos ambos procesos, los nuevos organismos difieren de sus progenitores.

¿Cómo lo consigue el cigoto? De entrada, este embrión unicelular acomete su propio desarrollo, en el que las células se multiplican para formar millones de nuevas células. Un crecimiento sometido a un control puntilloso para que, por ejemplo, los dos pies acaben teniendo la misma longitud. Luego esas células tienen que emprender un proceso de diferenciación, por el que unas pasarán a ser células sanguíneas y otras serán nerviosas, óseas, etcétera. Y esas células embrionarias habrán de abordar la morfogénesis: la formación ordenada de tejidos y órganos, donde múltiples células nerviosas distintas integrarán el cerebro, y donde el aparato digestivo se dividirá en esófago, estómago, intestinos, páncreas e hígado. Desarrollo, diferenciación y morfogénesis constituyen las tareas básicas del cigoto.

La infertilidad no es un fenómeno raro. Las estadísticas lo cifran en un 15 por ciento de las parejas del mundo. Para remediarlo se acude a la fecundación in vitro. Se dice que Enrique IV de Castilla recurrió ya a la fecundación artificial. Tras la búsqueda infructuosa de un heredero con su segunda mujer, Juana de Portugal, se procuró la ayuda del médico de la corte. Con sobrado ingenio, ese galeno del siglo xv inventó una suerte de jeringa con tubo de oro, recogió una muestra de semen del monarca y lo inyectó en la vagina de la reina. El método resultó y de esa inseminación artificial nació una niña: Juana la Beltraneja. Tres siglos más tarde, la inseminación artificial fue realizada con notable éxito en perros por Lazzaro Spallanzani en 1782, del que nacieron ocho cachorros spaniel. Semejante éxito alentó a los ganaderos a adoptar el método para la mejora de su cabaña.

El salto de los animales a los humanos se dio con éxito en los años cuarenta del siglo xx. Con ello nació una línea de investigación de enorme interés tanto social como científico y que, en la era actual de la biotecnología, promete espectaculares avances para un futuro próximo [*véase* «Nuevos medios de reproducción», por Karen Weintraub; Investigación y Ciencia, mayo de 2018].

—Luis Alonso

NOVEDADES

Una selección de los editores de *Investigación y Ciencia*



INTELIGENCIA ARTIFICIAL
CÓMO CAMBIARÁ EL MUNDO (Y TU VIDA)

Pablo Rodríguez Rodríguez
Deusto, 2018
ISBN: 978-84-234-2944-8
304 págs. (17,95 €)



MENTES MARAVILLOSAS
LOS MATEMÁTICOS QUE CAMBIARON EL MUNDO

Ian Stewart
Crítica, 2018 [septiembre]
ISBN: 978-84-9199-019-2
320 págs. (22,90 €)



UN CIENTÍFICO EN EL PAÍS DE LAS MARAVILLAS
CUANDO LA VERDAD DUELE

Edzard Ernst
Next Door Publishers, 2018
ISBN: 978-84-947810-7-0
238 págs. (24,70 €)

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

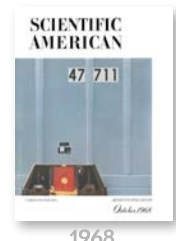
OCTUBRE

1968

El primer púlsar

«Hace casi un año, a un reducido grupo de operadores que manejaban un nuevo radiotelescopio en la Universidad de Cambridge, les sorprendió descubrir que unas radioseñales débiles e intermitentes, procedentes de un punto interestelar, se mostraban, al ser examinadas con más detalle, como una sucesión de pulsos tan regularmente espaciados como los de unas señales horarias de radiodifusión. Con un escepticismo rayano en la incredulidad, el grupo de Cambridge inició unas investigaciones sistemáticas encaminadas a desvelar la naturaleza de aquellas extrañas señales. A fin de cuentas, los astrónomos avezados no cometen el error de suponer que todas las señales raras que registran sean genuinamente celestiales; en 99 casos de cada 100, las fuentes de radio variables anómalas resultan ser algún tipo de interferencia eléctrica, como el sistema de encendido de un automóvil mal antiparasitado o una conexión defectuosa en un frigorífico cercano. Finalmente concluimos en que la única explicación plausible de aquellas desconcertantes señales era que de algún modo se debían a las vibraciones de una estrella colapsada, tal como una enana blanca o una estrella de neutrones. —Anthony Hewish»

Hewish compartió el premio Nobel de física en 1974 por sus investigaciones en radioastrofísica.



1968



1918



1868

1918

Defensa antigás

«En la guerra de trincheras no hay espacio para los balones de oxígeno individuales. Así pues, la máscara antigás no es un respirador que proporcione a quien la lleva una atmósfera artificial en la que respirar; es un filtro que hace apto para el uso el aire envenenado circundante. Al principio no fue complicado diseñar una máscara para esa función. Los alemanes estaban empleando solo gas cloro, y este es químicamente muy activo; se combina con casi todo lo que halla a su paso. No fue difícil encontrar un reactivo eficaz para el cloro e incluir en la máscara una cantidad suficiente de él. Pero conforme los químicos se especializaban más en el campo de los gases tóxicos e introducían más variedades en sus ataques, se hizo necesaria una defensa previsora en consonancia. Tras pruebas exhaustivas, los químicos descubrieron que debe concederse prioridad absoluta al carbón vegetal obtenido de huesos de melocotón, albaricoque, aceitunas y cerezas y de cáscaras de nueces y de coquitos de Brasil. Cada máscara requiere 3,20 kilogramos de semillas y cáscaras.»



1918: Un mensajero estadounidense maneja su motocicleta atravesando un pueblo «inundado de gas» cercano a la primera línea del frente europeo. Lleva un modelo antiguo de máscara antigás.

1868

Azúcar y esclavitud

«De un corresponsal en La Habana, Ezra K. Dod, hemos recibido un comunicado acerca de sus experiencias en las haciendas azucareras de la "isla siempre leal", y en el que pide mejorar nuestros intereses azucareros. "Es bien sabido que en Francia el coste de la manufactura se ha reducido proporcionalmente más que el precio, y el negocio es rentable; en cambio aquí el coste de la zafra y la manufactura es ahora mayor que en 1830, pues el valor de los negros casi se ha triplicado. No creo que en la isla haya una hacienda que hoy cubra gastos. La depreciación de las tierras, los edificios, etcétera, no deja sino unos 150 dólares al año por cada negro; una suma insuficiente para cubrir los intereses sobre su coste, las defunciones y su depreciación anual, y sin embargo la consigna es de más peones."»

En Cuba la esclavitud no fue abolida por completo hasta 1886.

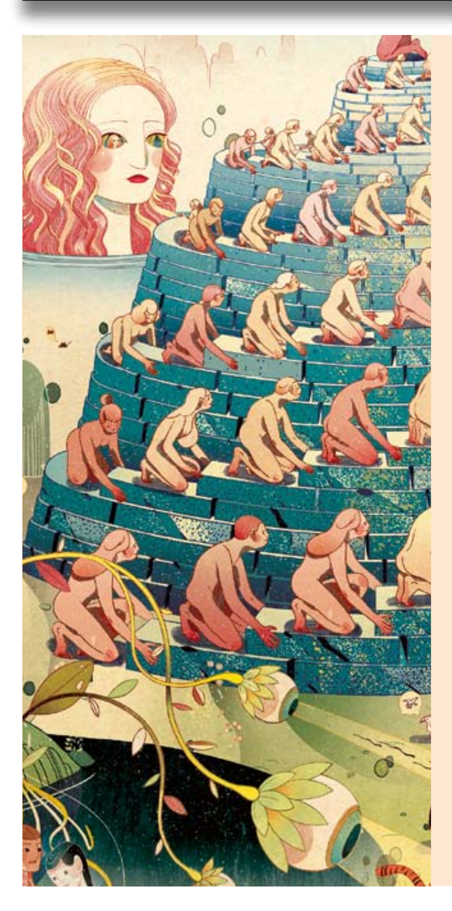
Opiniones sobre la teoría de Darwin

«En su reciente discurso ante la Asociación Británica en Norwich, el doctor J. D. Hooker afirma que "han transcurrido diez años desde la publicación de *El origen de las especies por medio de la selección natural*, y así no es ahora prematuro preguntar cuál es el estado de la opinión científica acerca de tan audaz teoría. Los escritores científicos que han rechazado públicamente las teorías de la evolución continua o de la selección natural adoptan esa postura por motivos físicos o metafísicos, o por ambos. Los argumentos de los que se basan en la metafísica suelen estar impregnados de prejuicios, e incluso de odio, y por ello son inaceptables como críticas científicas. Yo mismo, al haber sido estudiante de filosofía moral en una universidad del norte, emprendí mi carrera científica con la plena esperanza de que la metafísica resultaría un útil mentor, si no toda una ciencia. Pero pronto descubrí que en nada me aprovechaba, y hace tiempo llegué a la conclusión, tan bien expresada por Louis Agassiz, que declara: "Confiamos en que no esté lejos el día en que universalmente se comprenda que la batalla de las evidencias se librará en el campo de la ciencia física y no en el de la metafísica"."»

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CXIX, N.º 15, 12 DE OCTUBRE DE 1918

NÚMERO MONOGRÁFICO

EL SER HUMANO: UNA ESPECIE SINGULAR



Parte 1: ¿POR QUÉ NOSOTROS?

COGNICIÓN
Nuestra excepcional inteligencia social
Kevin Laland

INGENIERÍA
Techno sapiens
Lewis Dartnell, José M. Mayo y Matthew Twombly

PSICOLOGÍA
Dos rasgos distintivos de nuestra mente
Thomas Suddendorf

BIOLOGÍA EVOLUTIVA
El puzle de la consciencia humana
Susan Blackmore

DESARROLLO HUMANO
Las ventajas evolutivas de crecer y madurar despacio
Ana Mateos

LENGUAJE
El habla a través del tiempo
Christine Kenneally

Parte 2: NOSOTROS Y ELLOS

NEUROCIENCIA
Cerebro humano, cerebro de primate
Chet C. Sherwood

EVOLUCIÓN
El último hominino
Kate Wong

ANTROPOLOGÍA
El origen de la moralidad
Michael Tomasello

SOCIOLOGÍA
¿Por qué combatimos?
Brian Ferguson

Parte 3: MÁS ALLÁ DE NOSOTROS

BIOLOGÍA
La evolución de las especies en la ciudad
Menno Schilthuizen

INTELIGENCIA ARTIFICIAL
Nuestros dobles digitales
Pedro Domingos

ASTROFÍSICA
Solos en la Vía Láctea
John Gribbin

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Bruna Espar Gasset
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN
EDITOR IN CHIEF AND SENIOR VICE PRESIDENT
Mariette DiChristina
PRESIDENT Dean Sanderson
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek

Difusión controlada

DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158
para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Prensa Científica, S. A.
Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros
El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO
Asesoramiento y traducción:
Andrés Martínez: *Apuntes*; Javier Grande: *Apuntes y ¿Es real la materia oscura?*; Elisa Vilaret: *Apuntes y Las termitas y los anillos de hadas*; Carlos Lorenzo: *¿Qué impulsó la evolución de un cerebro voluminoso?*; Ana Mozo: *El estrecho nexo entre la inmunidad y el cerebro*; Fabio Teixidó: *Olas monstruosas, La necesaria colaboración antártica y Las leyes de Lyell, a examen*; Xavier Roqué: *Cien años de* Espacio, ciencia y materia; José O. Hernández Sendín: *Arte con números*; Mercè Piqueras: *La masa devoradora: una célula gigante e inteligente*; Anna Romero: *Enanismo en alza*; J. Vilardell: *Radiografías en color y Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. de Caldes, km 3
08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España